

УДК 621.313.5

**ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ  
ЛЕНТОЧНОЙ НАМОТКИ МОМЕНТНОГО  
ДВИГАТЕЛЯ**

А.Г. Иванова, Р.Э. Кодермятов, В.М. Мартемьянов

Томский политехнический университет

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru

**Иванова Антонина Геннадьевна**, ассистент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru

Область научных интересов: исследование и разработка исполнительных электро-механических элементов систем автоматики.

**Кодермятов Радик Эмирханович**, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru

Область научных интересов: исследование электро-механических элементов.

**Мартемьянов Владимир Михайлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru

Область научных интересов: исследование и разработка электро-механических элементов приборных устройств.

В настоящей работе исследуются температурные режимы ленточной намотки моментного двигателя, которая представляет собой новый вариант активного элемента исполнительных устройств. Исследования проводились с целью выяснения влияния величины и длительности протекания тока на температурные и моментные характеристики моментного двигателя, работающего в импульсном режиме. Исследования носят аналитический характер и выполнены с помощью программного продукта COMSOL Multiphysics. В результате исследований получен характер распределения температурных полей в ленточной намотке моментного двигателя при различных вариантах установки намотки в двигатель, а также при выполнении дополнительных вырезов, необходимых для формирования заданной функциональной зависимости моментной характеристики двигателя. Для всех случаев конструктивного исполнения рассмотрено влияние величины и длительности протекания тока на силовую (моментную) характеристику двигателя. Продемонстрированы возможности применения предложенной методики исследования при расчете и проектировании подобных двигателей.

**Ключевые слова:**

Ленточная намотка, моментный двигатель, аналитические исследования, COMSOL, температурный режим, силовая характеристика, теплоотвод.

Одним из эксплуатационных преимуществ моментного двигателя с ленточной намоткой является возможность пропускания по последней достаточно большого тока. Необходимый характер протекания по намотке тока обусловлен наличием боковых вырезов [1]. В местах, где выполнены такие вырезы, происходит резкое увеличение плотности тока и интенсивное выделение тепла. Повышенная токовая нагрузка рассматриваемого двигателя объясняется тем, что вблизи зон повышенного тепловыделения находятся области, в которых это тепло поглощается и рассеивается. На первоначальном этапе проведения экспериментальных исследований [2] на одиночных элементах намотки (пластинах) получены данные, показывающие, что даже при значительных плотностях тока в местах сужения ленты температура ее отдельных участков не превышает допустимых значений, под которыми предполагались величины, соответствующие большинству изоляционных электротехнических материалов.

Следующий этап заключается в проведении аналитических исследований температурного поля намотки. Последнюю можно в конструктивном плане представить состоящей из последовательно расположенных вдоль окружности отдельных пакетов пластин, обладающих идентичными характеристиками. Поэтому достаточно рассмотреть тепловые процессы в одном пакете и полученные результаты распространить на другие элементы намотки. С целью упрощения задачи принимаем плоскую геометрию пакета. Считаем также, что токовые линии отдельных слоев пакета (отдельных пластин) не переходят из одного слоя в другой. При этом

предположении изоляцией между пластинами пренебрегаем, и в математической модели пакет представляет собой сплошную структуру с однородными физическими характеристиками, к которым в первую очередь следует отнести теплопроводность. Данное предположение вполне допустимо, если считать, что электрическая изоляция пластин представляет собой тонкий слой окисла металла, из которого выполнены эти пластины; при решении поставленной задачи предполагается использовать медь.

Аналитические исследования проводились с использованием программного продукта COMSOL Multiphysics в мультифизическом режиме с использованием модуля Heat Transfer – Joule Heating. Предполагалось, что рассматриваемый пакет состоит из 100 пластин толщиной 0,1 мм, длиной 100 мм и высотой 50 мм. По каждой пластине пропускается начальный ток величиной 50 А, а суммарно по пакету пластин – 5000 А. Так как одно из возможных применений моментного двигателя – импульсный маховик, то время протекания тока по пакету задавалось не более 1 с. В процессе исследований рассматривались различные варианты установки в двигатель ленточной намотки и, соответственно, способы закрепления пакета (рис. 1–4). На указанных рисунках показаны температурные поля пакетов пластин после пропускания по ним тока в течение промежутка времени 1 с. Рассмотрены случаи, когда теплоотвод отсутствует (рис. 1); пакет установлен на массивном теплоотводе (рис. 2); пакет закреплен на теплоотводе Т-образного сечения, масса которого равна массе массивного теплоотвода (рис. 3). На рис. 4 представлена картина температурного поля пакета с дополнительными вырезами, необходимыми для формирования заданной функциональной зависимости моментной характеристики [3].

Анализируя температуру по окончании цикла протекания тока, следует отметить, что ее максимальное значение не превышает 80 °С, что для условий эксплуатации упомянутого выше маховика не является серьезным препятствием.

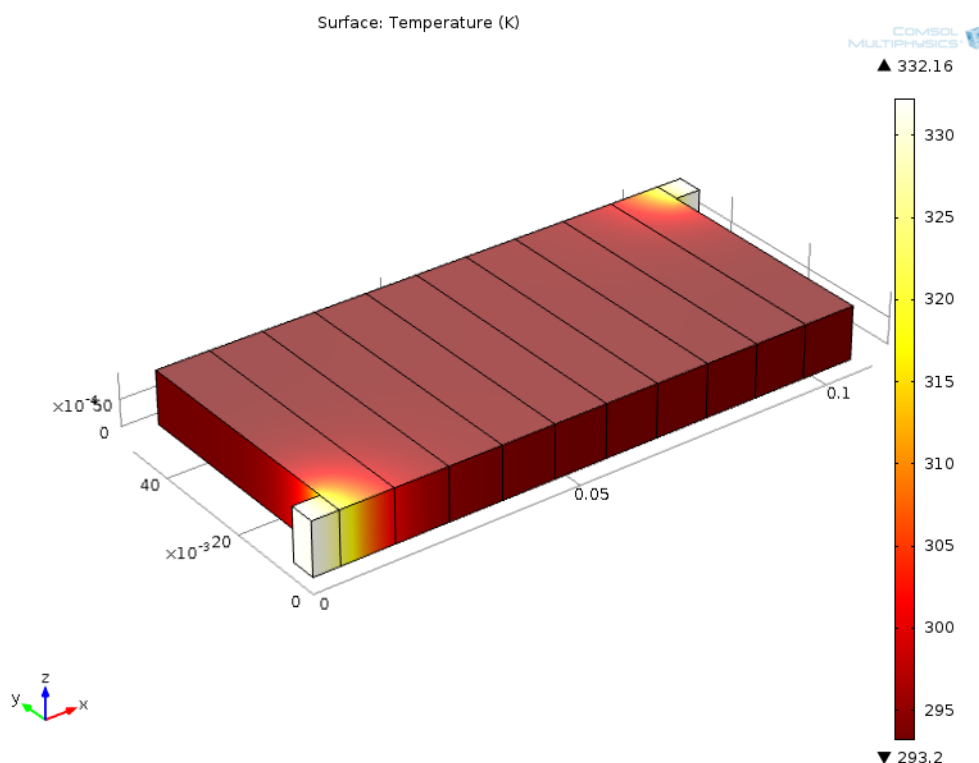
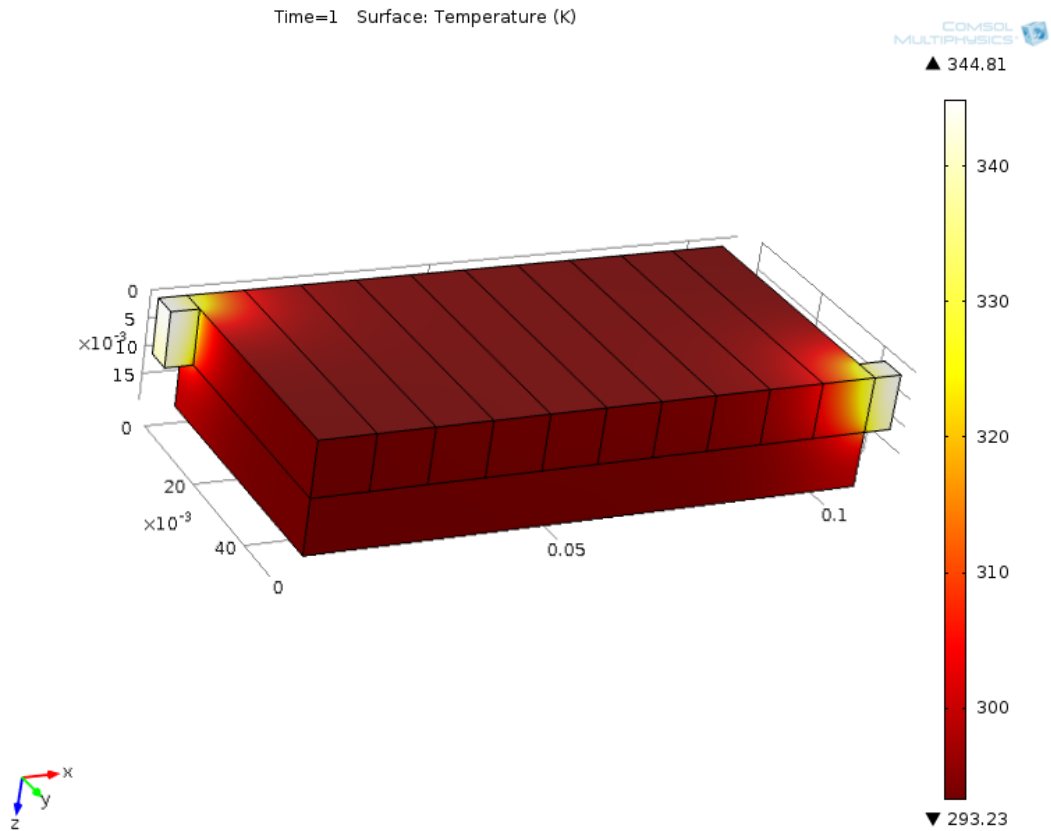
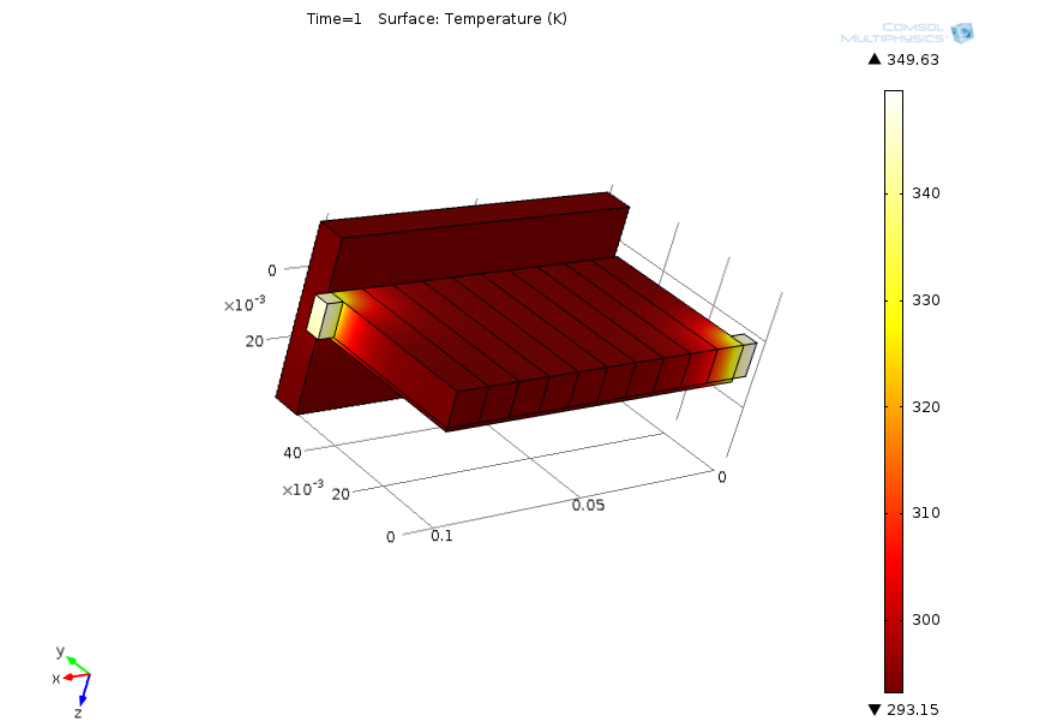


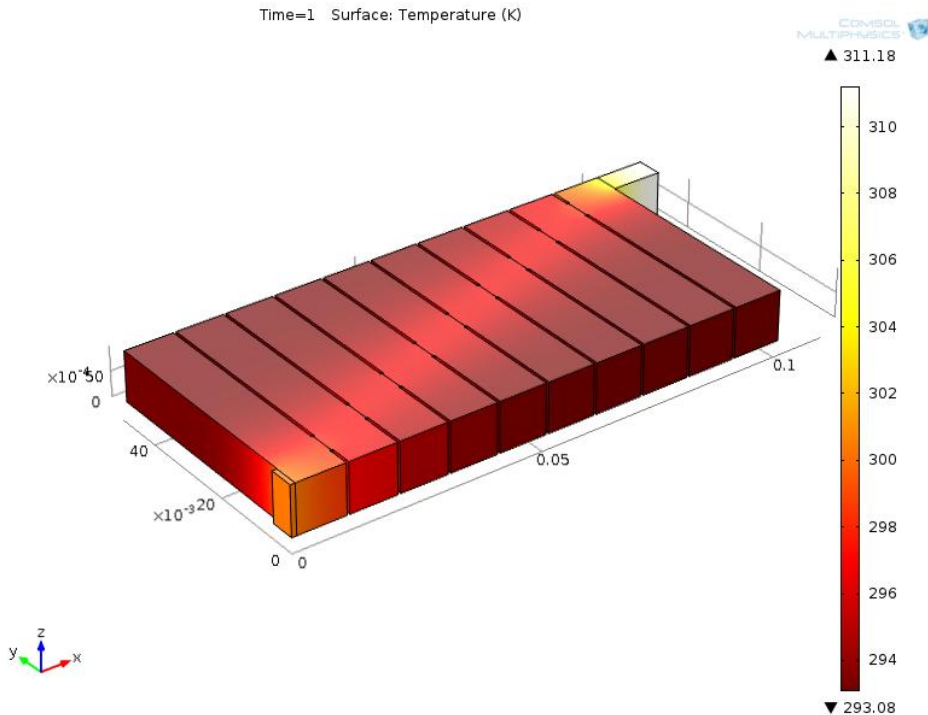
Рис. 1. Распределение температурного поля в пакете пластин при отсутствии теплоотвода



**Рис. 2.** Распределение температурного поля в пакете пластин, установленном на массивном теплоотводе

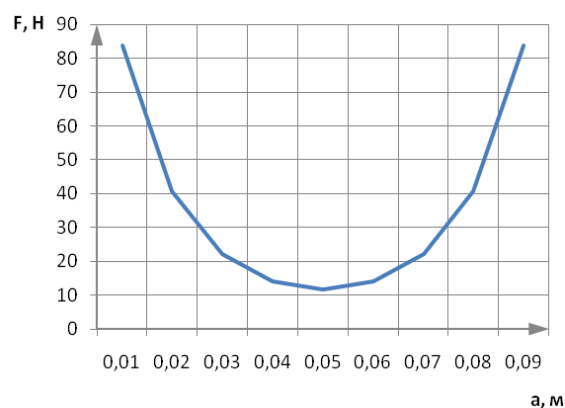


**Рис. 3.** Распределение температурного поля в пакете пластин, закрепленном на теплоотводе Т-образного сечения



**Рис. 4.** Распределение температурного поля в пакете пластин с дополнительными вырезами при отсутствии теплоотвода

В процессе протекания тока пластины нагреваются, меняются их омическое сопротивление, величина тока, а в конечном итоге и сила, развиваемая между токами в пакете и источником магнитного потока [3]. С целью выяснения влияния нагрева на величину развиваемой силы был проведен расчет последней в исходном («холодном») состоянии и после цикла протекания тока. На рис. 5 показана закономерность изменения силы по длине пакета в исходном состоянии (рассматриваются пакеты без дополнительных вырезов).



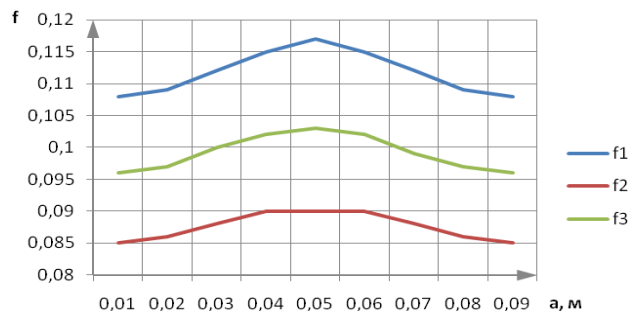
**Рис. 5.** Характер изменения силы по длине пакета в исходном состоянии

На рис. 6 продемонстрированы зависимости относительных изменений  $f$  силы в конце цикла протекания тока. Параметр  $f$  определяется следующим образом:

$$f_i = \frac{F_{Hi} - F_{Ki}}{F_{Hi}},$$

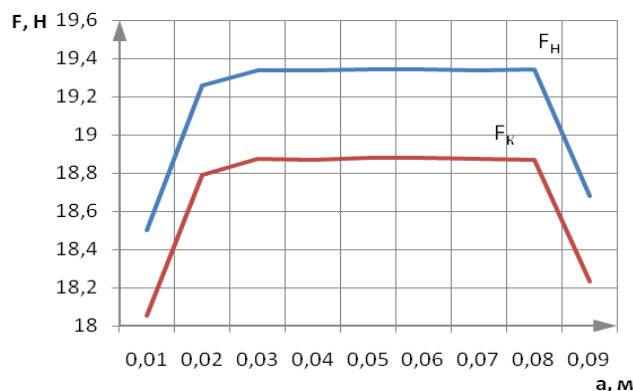
где  $F_{Hi}, F_{Ki}$  – значения развиваемых сил в точке  $i$  по длине пакета в начале цикла протекания тока и при его окончании соответственно. Параметр  $f_1$  относится к пакету пластин без

теплоотвода,  $f_2$  – к пакету на массивном теплоотводе,  $f_3$  – к пакету, который установлен на теплоотводе с Т-образным сечением.



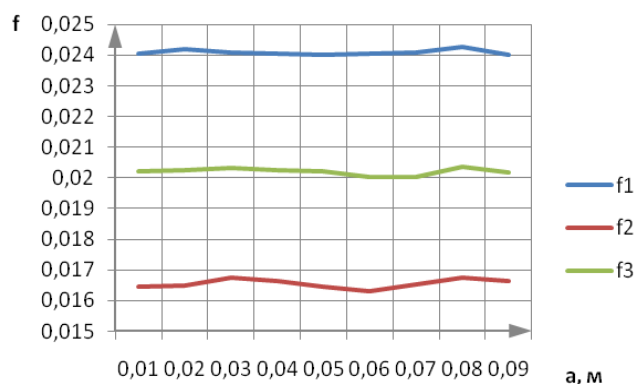
**Рис. 6.** Относительные изменения развиваемой силы в конце цикла протекания тока

Аналогичные исследования были проведены и для пакета с дополнительными боковыми вырезами. На рис. 7 показаны зависимости развиваемой силы в начале цикла протекания тока  $F_H$  и при его окончании  $F_K$ . Данные зависимости относятся к случаю исследования пакета без теплоотвода.



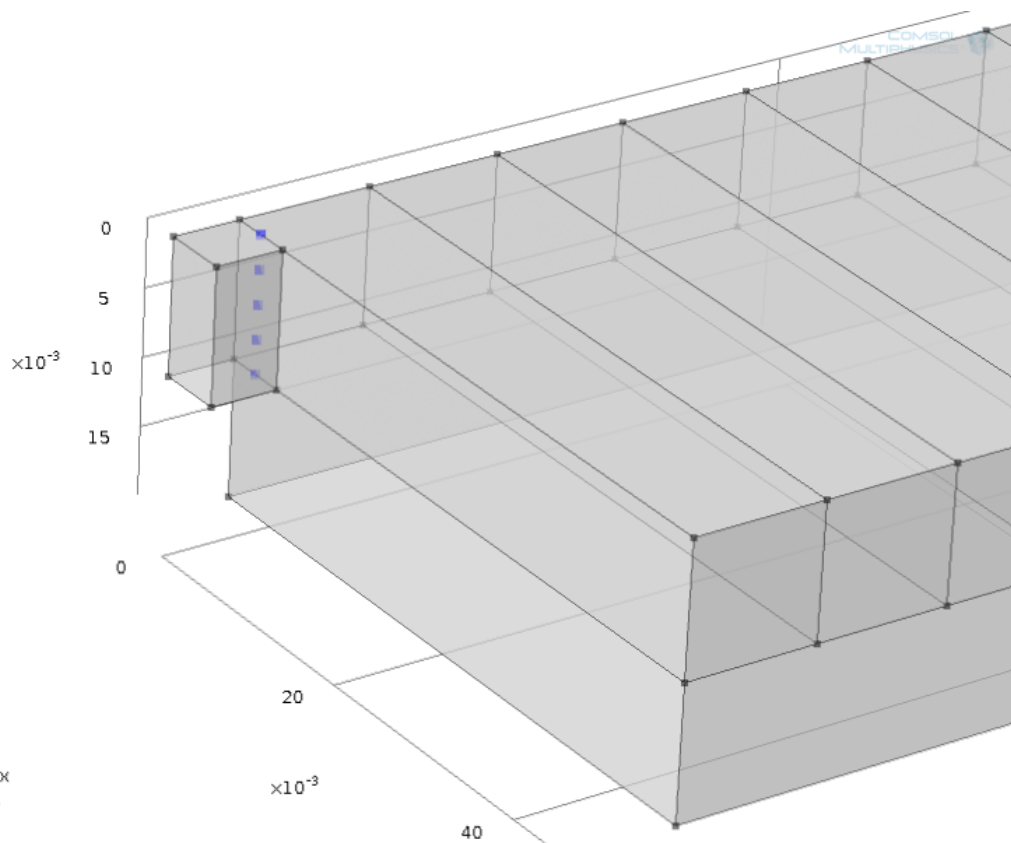
**Рис. 7.** Зависимости изменения развиваемой силы пакетом с дополнительными вырезами в начале и окончании цикла протекания тока

Графики относительного изменения силы при использовании теплоотводов приведены на рис. 8. Обозначения для этих графиков аналогичны приведенным на рис. 6.



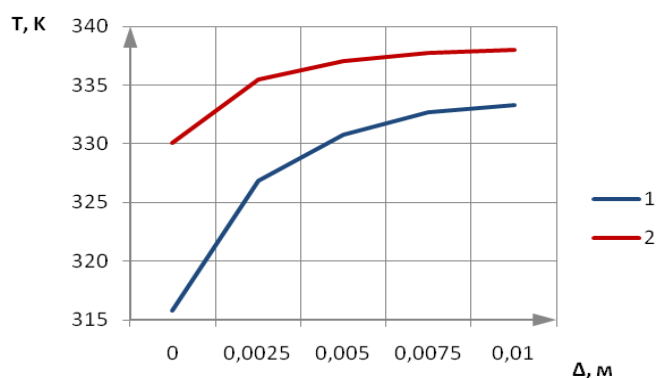
**Рис. 8.** Относительные изменения развиваемой силы в конце цикла протекания тока для пакета с дополнительными вырезами

Определенный интерес представляет закономерность распределения температуры по толщине пакета в наиболее его теплонапряженной зоне – в районе расположения электрода. На рис. 9 показаны точки, в которых рассчитывалась температура пакета после цикла протекания тока.



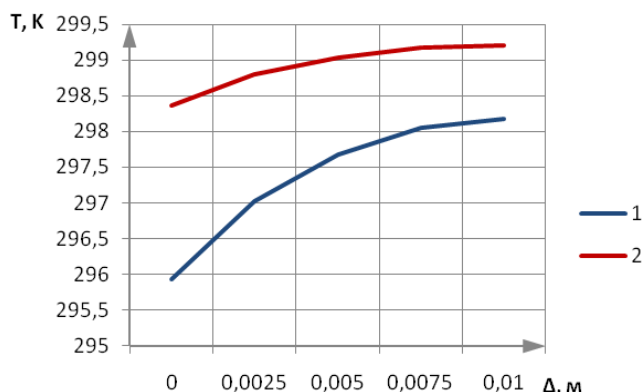
**Рис. 9.** Точки измерения температуры околоэлектродного пространства пакета

Характер изменения температуры представлен графиками рис. 10, которые представляют собой зависимости в случае применения массивного тепловода (кривая 1) и тепловода с Т-образным сечением (кривая 2). Указанные характеристики относятся к исследованию пакета без дополнительных вырезов. Координата  $\Delta$  отсчитывается вдоль толщины пакета от плоскости соприкосновения с тепловодом.



**Рис. 10.** Зависимости распределения температуры в околоэлектродном пространстве пакета без дополнительных вырезов

Аналогичные исследования проведены и для пакета с дополнительными вырезами; результаты отображены графиками рис. 11.



**Рис. 11.** Зависимости распределения температуры в околоэлектродном пространстве пакета с дополнительными вырезами

Обратим внимание на начальный период времени протекания тока в околоэлектродной зоне пластины. В момент подачи тока распределение по пластине элементарных токовых линий будет соответствовать решению задачи в случае, когда влияние выделения джоулева тепла не учитывается. При этом большая плотность тока наблюдается у тех токовых линий, которые проходят по участкам с меньшим омическим сопротивлением. Происходящий с течением времени нагрев этих участков и, соответственно, увеличение их сопротивления приведет к тому, что токовые линии изменят свое направление, стремясь пройти по участкам, где сопротивление будет меньше. Изменение траекторий протекания элементарных токов можно оценить по характеру изменения интеграла поперечных компонент полного тока, взятого по поверхности, ограниченной зоной прохождения через пластину магнитного потока [2].

В нашем случае эта зона выбрана в виде околоэлектродного пространства, в котором крутизна траекторий токовых линий наибольшая. Однако отметим, что оценка вариаций траекторий токовых линий только по характеру изменения вышеупомянутого интеграла поперечных компонент полного тока будет неверной, так как сам полный ток зависит от сопротивления постепенно нагревающейся пластины. Учитывая последнее, предлагается использовать для анализа безразмерный коэффициент

$$k = \frac{D(j_y, x, y)}{I_{\Pi}},$$

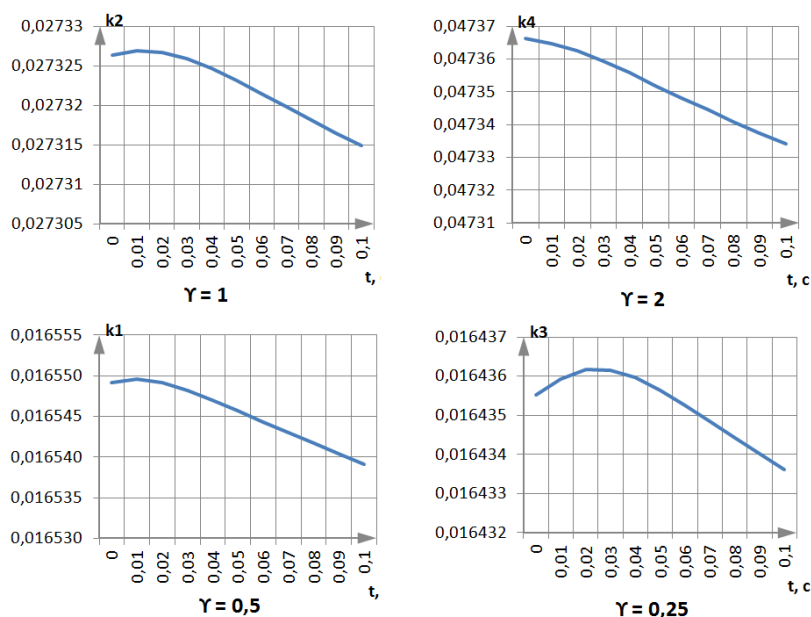
где  $D(j_y, x, y)$  – величина интеграла поперечных компонент полного тока [3];  $I_{\Pi}$  – полный ток, протекающий через электрод пластины.

Полный ток  $I_{\Pi}$  определяется интегрированием нормальных компонент тока на поверхности электрода. Во всех случаях предполагается неизменность подаваемого к электродам пластины напряжения питания.

Результаты проведенных аналитических исследований с помощью программного продукта COMSOL Multiphysics представлены в виде графиков на рис. 12. Каждый график соответствует определенному геометрическому параметру пластины

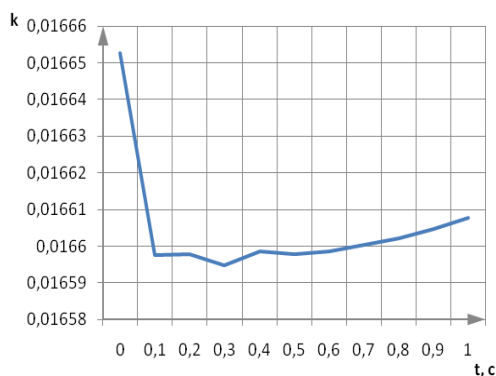
$$\gamma = \frac{b}{a},$$

где  $a$  – длина пластины;  $b$  – ее ширина.



**Рис. 12.** К оценке характера изменения траекторий токовых линий в начальный период цикла протекания тока

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что наиболее отчетливо описываемый выше процесс наблюдается в пластинах, выполненных удлиненными, у которых в околоэлектродном пространстве крутизна токовых линий не столь значительна. При более длительном протекании тока происходит усреднение температуры пластины, токовые линии занимают стабильное положение, о чем свидетельствует график, приведенный на рис. 13.



**Рис. 13.** К оценке характера изменения траекторий токовых линий при длительном периоде протекания тока

Проведенные исследования дали возможность оценить температурные характеристики разрабатываемого макета моментного двигателя с ленточной намоткой и получить необходимые рекомендации с целью оптимизации конструкции макета.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31068 мол\_а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова А.Г., Мартемьянов В.М., Кодермятов Р.Э. Исполнительные двигатели с ленточной намоткой // Вестник науки Сибири, № 1 (7) (2013). – С. 42–49. – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/604>



2. Дмитриева Е.М., Иванова А.Г. Экспериментальное определение температурных характеристик пакетного элемента // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ. – Т. 1. – 2010. – С. 413-414.
3. Иванова А.Г., Мартемьянов В.М., Плотникова И.В. Влияние геометрии пластины на силовую характеристику двигателя с активным пакетным элементом// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 4. – С. 22–26.

Поступила 26.01.2015 г.