

Особенности расчета нагрева электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT

В.М.Гандшу

Первым этапом при расчете любой задачи с помощью пакета программ ELCUT [1] является создание геометрической модели. При этом каждому блоку присваиваются те или иные свойства в рамках того формата, который задан разработчиками пакета. На практике при расчете электромагнитных устройств постоянно встречаются случаи, когда этот процесс не может быть сведен просто к подстановке величин, взятых из соответствующих справочников. В данной работе будут проанализированы особенности задания теплопроводности наиболее часто встречающимся блокам при расчете нагрева любых электромагнитных устройств (прежде всего – электрических машин). Будут рассмотрены три случая: шихтованные сердечники, насыпные обмотки и замкнутые газовые полости.

1. Шихтованные стальные сердечники

Из отмеченных выше проблем тепловая анизотропность шихтованных сердечников наиболее полно отражена в имеющейся литературе [3] (отметим к тому же, что в этой книге приведен наиболее полный справочник по теплофизическим характеристикам изоляционных, магнитных и проводниковых материалов, используемых в электротехнике). С учетом современного сортамента выпускаемых сталей эти данные можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1.

Марки стали по ГОСТ 21427 [7]	21...	22...	23...	24..., 34...
Содержание кремния, %	0.4÷0.8	0.8÷1.8	1.8÷2.8	2.8÷3.8
Продольная теплопроводность λ_{Fal} , Вт/(К·м)	48÷41	36÷39	21÷23	19÷21
Поперечная теплопроводность λ_{Fcr} , Вт/(К·м)	3÷4 (лакированные листы)			

Отметим, что на поперечную электропроводность марка стали практически не оказывает влияние, так как она зависит в первую очередь от теплопроводности изолирующего слоя и давления спрессовки. В принципе для каждого изготовителя электротехнических устройств в зависимости от принятой технологии изолировки листов и сборки пакетов значения теплопроводности λ_{Fcr} будут разными. Однако

учитывая, что в основном на отечественных заводах листы лакируются, а пакеты спрессовываются при давлении $p_{\text{пак}} = 1 \div 2$ МПа, можно принять общую приближенную оценку λ_{Fcr} , приведенную в табл. 1.

Необходимо учесть, что все вышеизложенное относится к листам и лентам электротехнической стали толщиной 0.5 мм, в то время как в настоящее время широко используются, особенно в высокочастотных устройствах, листы и, особенно, ленты толщиной до 0.15 мм. Очевидно, что при постоянном размере толщины пакета, чем тоньше лист, тем меньше в пакете стали и больше изоляции, т.е. с уменьшением толщины листа падают теплопроводности, как вдоль листа, так и поперек, но в разной степени. Продольная теплопроводность пропорциональна количеству стали, а поперечная – обратно пропорциональна количеству изоляции. Количественный учет толщины материала может быть произведен на основе коэффициента заполнения пакета сталью k_{st} , который представляет собой отношение суммарной длины чистой стали к конструктивной длине шихтованного пакета. Зависимость его от толщины материала известна [8] (здесь приводятся данные только для лакированных листов, поскольку именно этот вид изоляции наиболее часто применяется в промышленности):

Таблица 2.

Толщина листа Δ , мм	0.50	0.35	0.25	0.15
Коэффициент заполнения k_{st}	0.93	0.91	0.88	0.81

По этим данным можно определить продольную и поперечную теплопроводности для любой толщины материала по формулам:

$$\lambda_{\text{Fal}\Delta} = \lambda_{\text{Fal}0.5} \cdot \frac{k_{\text{st}\Delta}}{0.93}, \quad \lambda_{\text{Fcr}\Delta} = \lambda_{\text{Fcr}0.5} \cdot \frac{0.07}{1 - k_{\text{st}\Delta}}.$$

Здесь $\lambda_{\text{Fal}\Delta}$, $\lambda_{\text{Fcr}\Delta}$ – продольная и поперечная теплопроводности шихтованного пакета, набранного из листов толщиной Δ ;

$\lambda_{\text{Fal}0.5}$, $\lambda_{\text{Fcr}0.5}$ – то же для листов толщиной 0.5 мм;

$k_{\text{st}\Delta}$, $k_{\text{st}0.5}$ – коэффициент заполнения пакета сталью при толщине листа Δ и 0.5 мм соответственно.

2. Всыпные обмотки

Прежде всего, отметим, что всыпными называются обмотки, выполненные из мягких секций, состоящих из сравнительно большого числа витков круглого эмалированного провода, диаметр которого, как минимум, на порядок меньше поперечного размера секции. При выполнении обмоток из жестких секций, состоящих из небольшого числа витков прямоугольного провода, каждый проводник строго позиционирован относительно стенок паза и его размеры сравнимы с поперечными размерами паза. Вследствие этого при описании модели можно четко указать положение проводников и всех элементов изоляции, а, следовательно, и теплопроводности соответствующих блоков. Иначе обстоит дело при всыпных обмотках. В такой обмотке проводники укладываются хаотично, даже многократно перекрещиваясь. Между ними имеет место неопределенное число, как касаний, так и воздушных промежутков неправильной формы (после пропитки эти промежутки частично заполняются изоляционным компаундом), вследствие чего практически невозможно задать точное положение медных и изоляционных областей. Очевидно, что в данном случае, как и в случае шихтовки, имеет место тепловая анизотропия: теплопроводности области, занятой мягкой секцией вдоль и поперек проводов (обозначим их соответственно λ_{Cal} и λ_{Cr}) существенно различаются.

Для определения теплопроводности вдоль проводов воспользуемся понятием технологического коэффициента заполнения паза медью k_T , определение которого можно найти в [4]:

$$k_T = \frac{d_{\text{из}}^2 u_n}{S_n - S_{\text{из}}} \quad (1)$$

Здесь $d_{\text{из}}$ – диаметр изолированного провода;

u_n – число проводов;

S_n – площадь паза;

$S_{\text{из}}$ – площадь, занятая пазовой изоляцией (пазовая коробочка, прокладки, клин).

Иными словами, данный коэффициент представляет собой отношение суммы площадей квадратов, описанных вокруг изолированного проводника, к площади паза, занятой только обмоткой, без изоляционных элементов.

Результирующая тепловая проводимость паза на единицу длины в осевом направлении Λ_{Cal} определяется только проводимостью чистой меди (теплопроводность меди более чем на 3 порядка превышает теплопроводность изоляции). Таким образом, можно записать:

$$\Lambda_{Cal} = \lambda_{Cu} u_n \frac{\pi}{4} d^2, \quad (2)$$

где λ_{Cu} – теплопроводность меди (380 Вт/К·м);
 d – диаметр провода по меди.

Введя понятие о коэффициенте изоляции проводов

$$K_{из} = \frac{d}{d_{из}} \quad (3)$$

и используя (1), преобразуем (2):

$$\Lambda_{Cal} = \lambda_{Cu} \frac{\pi}{4} K_{из}^2 k_T (S_n - S_{из}) \quad (4)$$

С другой стороны, тепловую проводимость вдоль проводов Λ_{Cal} можно выразить через эквивалентную теплопроводность обмотки в этом направлении λ_{Ccr} :

$$\Lambda_{Cal} = \lambda_{Ccr} (S_n - S_{из})$$

Отсюда получаем

$$\lambda_{Ccr} = \lambda_{Cu} \frac{\pi}{4} K_{из}^2 k_T \quad (5)$$

Практически все члены в правой части формулы (5) известны: технологический коэффициент заполнения паза медью для насыпных обмоток в отечественной практике составляет для электрических машин при ручной намотке $0.73 \div 0.75$, при машинной – $0.70 \div 0.72$, коэффициент изоляции проводов известен по сортаменту примененных проводов (задать его какой-то величиной не пред-

ставляется возможным, так как он сильно зависит от диаметра провода). Коэффициент изоляции проводов $K_{из}$ трех наиболее применяемых марок (ПЭВ-2, ПЭТ-155, ПЭФ-155) приведен на рис. 1 (синяя кривая). Здесь же представлены результаты определения продольной теплопроводности по формуле (5) для этих же проводов при значении технологического коэффициента заполнения равном 0.72 (красная кривая). Характерно, что результирующая продольная теплопроводность пучка проводов более чем в 2 раза ниже теоретического значения теплопроводности чистой меди.

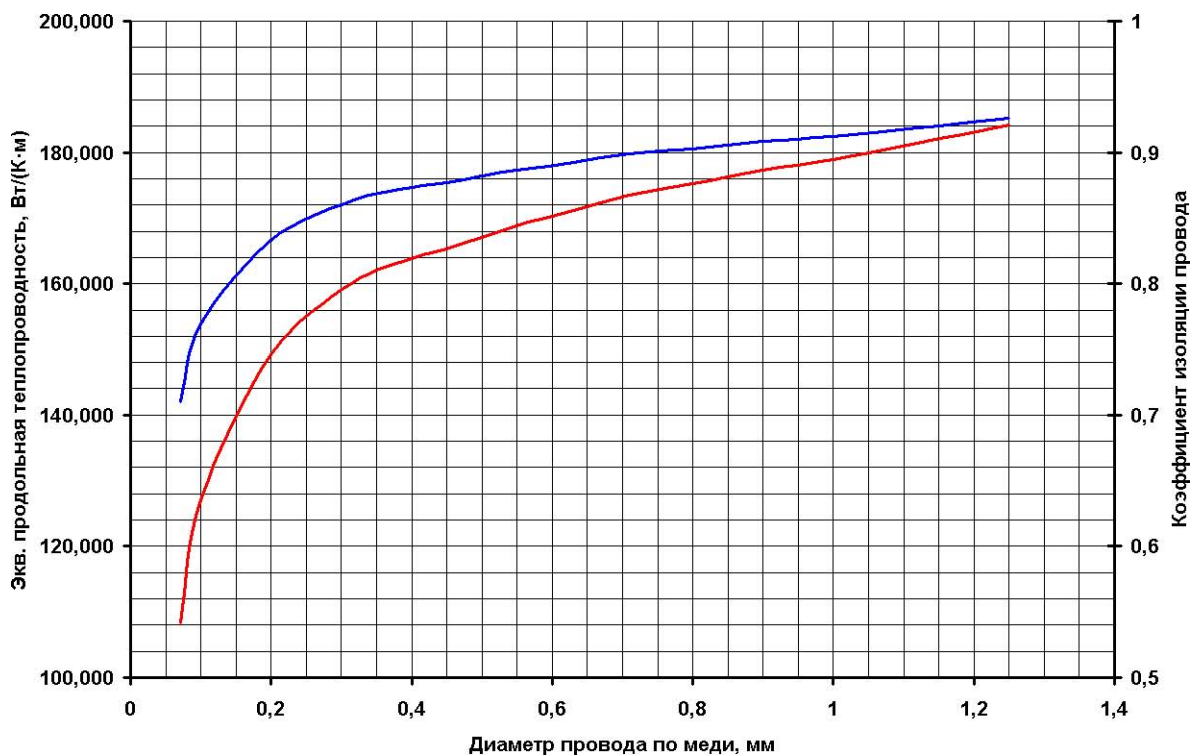


Рис. 1. Коэффициент изоляции проводов (синяя кривая) и продольная теплопроводность (красная кривая) в зависимости от диаметра провода.

Полученное выражение (5) может быть использовано для любых других намоточных изделий, а не только для электрических машин, надо только подставить соответствующее значение k_T . Так для катушек трансформаторов и реле, наматываемых на каркас специальными станками, строго соблюдающими порядок рядов, этот коэффициент следует брать равным 0.9.

Проанализируем эквивалентную теплопроводность области, занятой мягкой секцией, поперек проводов $\lambda_{ср}$. В данном случае определяющее значение будет иметь теплопроводность изоляции, которая состоит из двух элементов: эмалевого покрытия проводов и пропиточного компаунда. Для наиболее часто применяемых

материалов (классы В, F и H) можно принять теплопроводность эмали и компаунда соответственно равными $\lambda_{эм}=0.16$ Вт/(К·м) и $\lambda_{км}=0.20$ Вт/(К·м). Для решения вопроса о значении эквивалентной поперечной теплопроводности $\lambda_{Ссг}$ необходимо воспользоваться эмпирическим соотношением, приведенным в [3]:

$$\lambda_{Ссг} = 0.165 \left(1 + \frac{t_{cp}}{1400}\right) [1 - 0.32 d_{из} (1 - 9.2 k_n + 5.2 k_n^2) + 0.8 d_{из}^2] (2.11 k_T^{1.5} - 0.32) \left(\frac{\lambda_{эм}}{0.165}\right)^{1/3} \left(\frac{\lambda_{км}}{0.143}\right)^{1/4}.$$

Здесь t_{cp} - средняя температура пучка проводов;
 k_n - технологический коэффициент пропитки.

В этом выражении $d_{из}$ подставляется в миллиметрах, t_{cp} - в градусах Цельсия, теплопроводности материалов и результат - в ваттах на градус и метр.

То обстоятельство, что теплопроводность является функцией температуры, которая на момент начала решения задачи о нагреве неизвестна, говорит о том, что понадобятся несколько итераций, для поиска решения, но не очень много, т.к. зависимость от температуры выражена очень слабо.

Гораздо сложнее вопрос с коэффициентом пропитки. Этот фактор характеризует степень вытеснения воздуха из промежутков между самими проводами и проводами и пазовой изоляцией. Это сугубо эмпирическая величина, меняющаяся в пределах от 0 до 1 и зависящая как от способа пропитки, так и от количества в компаунде твердых частиц. При выборе её значения можно полагаться только на следующие практические рекомендации:

- окунание 0.1÷0.3
- капельная пропитка 0.3÷0.6
- вакуумная пропитка 0.6÷0.9

Результаты расчетов по данной формуле при средней температуре обмотки 140^0C и технологическом коэффициенте заполнения $k_T=0.72$ представлены на рис. 2. При расчетах принято, что теплопроводность проводной эмали равна $\lambda_{эм}=0.165$ Вт/(К·м), а теплопроводность пропиточного компаунда составляет $\lambda_{км}=0.200$ Вт/(К·м).

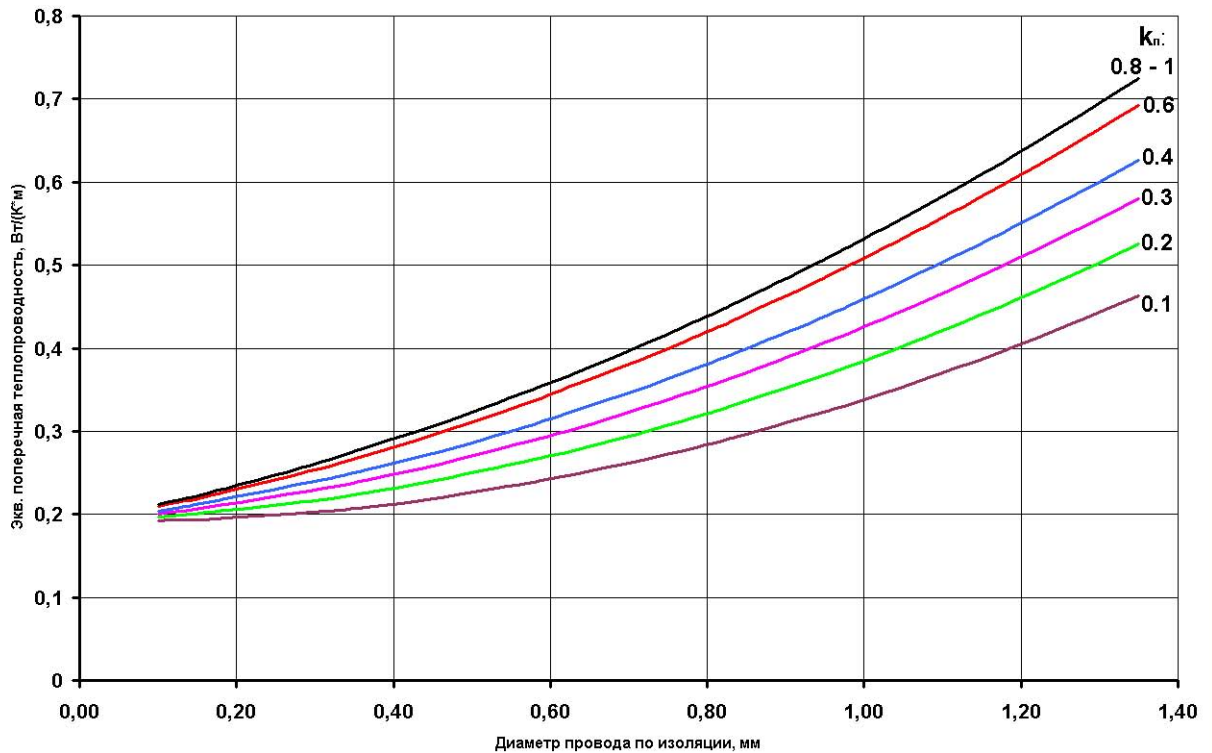


Рис. 2. Зависимость эквивалентной поперечной теплопроводности от диаметра провода

3. Газовые полости

На практике очень часто встречаются закрытые и даже герметизированные электротехнические устройства (степень защиты IP54 и выше по ГОСТ 14254 [5]). Это могут быть закрытые электрические машины или электронные блоки с естественным охлаждением корпуса или обдуваемые снаружи. Все они характеризуются тем, что тепловыделяющие элементы, находящиеся внутри корпуса, полностью или частично передают тепло газовой среде, находящейся внутри корпуса, а она отдает его внутренним поверхностям корпуса и через него – наружу. Передача тепла от нагретых внутренних частей к газу и от него к корпусу происходит путем конвекции и радиации. В данной работе будут рассмотрены только те устройства, в которых отсутствуют охладители внутреннего газа (теплообменники) и его принудительная циркуляция по осевым или радиальным каналам, поскольку в этих случаях уже невозможно решать задачу в двумерной или осесимметричной постановке. Двумерная постановка невозможна, т.к. из-за существенного изменения температуры вдоль канала [2] нарушается условие неизменности свойств по третьей координате, а осесимметричная постановка невозможна, т.к. наличие каналов нарушает требование неизменности свойств в тангенциальном направлении по любому радиусу.

В рассматриваемых устройствах внутренний газ движется в полостях только под воздействием конвекции, как в различного рода статических устройствах, или под влиянием вентилирующего действия вращающегося ротора с лопатками или без них, что имеет место в электродвигателях и генераторах. Применительно к вращающимся электрическим машинам этот способ охлаждения может быть охарактеризован кодами IC 40 или IC 41 по ГОСТ 20459 [6].

При расчете нагрева закрытых устройств с помощью пакета ELCUT возникает проблема с описанием границ внутренней газовой среды, т.к. в соответствии с руководством по применению пакета при задании коэффициента теплоотдачи на какой-либо границе необходимо одновременно задать температуру на этой границе, а эта температура неизвестна. Обойти данный запрет возможно, если принять во внимание, что газ вне зависимости от того, есть ли внутри какие-либо перемешивающие устройства или нет, имеет во всем объеме, исключая очень тонкий пограничный слой, одну и ту же температуру (все дальнейшее будет относиться к области сравнительно низких перепадов температур и нормальных давлений, когда конвективный и радиационный теплообмен можно считать линейными функциями от разности температур). Опираясь на это положение и зная коэффициенты теплоотдачи как от тепловыделяющих элементов к газу, так и от газа к корпусу $\alpha_1 \dots \alpha_n$, где n – число участков, в пределах которых можно считать коэффициент теплоотдачи постоянным, вводим в расчет некие условные гипотетические среды, которые назовем $BA_1 \dots BA_n$ (*Boundary Air ...*) и TSC (*Thermal Superconductivity*). Эти среды характеризуются следующими значениями теплопроводности:

$$\lambda_{BA_i} = \alpha_i \cdot \delta \quad (i=1 \dots n), \quad \lambda_{TSC} = 10^5 \quad (7)$$

Здесь δ - очень малое расстояние по сравнению с размерами описываемых областей (вообще-то она может быть выбрана произвольно, но практика расчетов показала, что её целесообразно принять равной 1 мм). В общем случае в рассматриваемой машине у различных тепловыделяющих элементов могут быть различные коэффициенты теплоотдачи, поскольку они в разной степени обтекаются внутренним газом. Так, поверхность корзины лобовых частей обмотки

статора электродвигателя, обращенная к ротору, лучше охлаждается газом, чем та поверхность, которая обращена к корпусу. По этой же причине и у корпуса могут быть различные участки со своими собственными коэффициентами теплоотдачи. При этом полагаем, что все газовые полости заполнены определенным образом условными средами (см. далее), конвективно-радиационная теплоотдача отсутствует, теплоотдача осуществляется только путем теплопроводности от нагретых частей к условным средам, а от них – к корпусу. В любом случае при вводе этих сред построение модели расчета нагрева проводится в следующей последовательности:

- Проводится вентиляционный расчет устройства, на основании которого определяются скорости обтекания внутренним газом всех внутренних поверхностей, а по ним - коэффициенты теплоотдачи (очевидно, что в статических устройствах такой расчет проводить нет необходимости, поскольку во всей области только один коэффициент теплоотдачи).
- По результатам этого этапа выделяются n участков, в пределах которых можно считать коэффициент теплоотдачи постоянным.
- В газовой области на расстоянии δ от тепловыделяющих элементов и от внутренней поверхности корпуса проводится граница, которой присваиваем свойство изотермы с неопределенной температурой (пятый пункт в окне задания свойств метки ребра).
- Объему между поверхностью каждого из n выделенных участков и данной границей присваивается свойство среды BA_i ($i=1 \dots n$).
- Всему остальному газовому объему присваивается свойство среды TSC.

При таком распределении газового объема между условными средами получаем, что:

1. тепловые проводимости на поверхности тепловыделяющих элементов и на внутренней поверхности корпуса в реальных условиях те же самые, что и при наличии условных сред;
2. весь газовый объем, за исключением пограничного слоя толщиной δ , имеет одну и ту же температуру, т.е. с помощью условных сред практически воссозданы реальные условия теплопередачи.

Действительно, в условиях конвективно-радиационного теплообмена с коэффициентом теплопередачи α_i при оговоренных выше условиях тепловая проводимость пограничного слоя Λ_i у i -го участка составляет

$$\Lambda_i = \alpha_i S_i, \quad (8)$$

где S_i – площадь поверхности теплоотдачи i -го участка. Эта же величина в расчетной модели при наличии условной среды толщиной δ может быть выражена соотношением

$$\Lambda_i = \lambda_{\text{BA}i} S_i / \delta$$

При подстановке (7) это выражение совпадает с (8). Что касается присвоения всему остальному объему сверхвысокой теплопроводности, то это имитирует равенство температуры в газовой среде, т.к. при такой тепловой "сверхпроводимости" никакие потоки не могут создать практически заметную разность температур.

4. Пример расчета

В заключение работы приведем пример расчета нагрева некоторого объекта, в котором будут использованы все описанные здесь приемы (задача *Block*). Расчету будет подвергнут некоторый герметизированный электронный блок цилиндрической формы, в котором источником тепла являются потери, выделяемые однофазным двухобмоточным тороидальным трансформатором, намотанном на витом сердечнике. Объект обладает осевой симметрией. Корпус заполнен воздухом. Какие-либо перемешивающие устройства внутри и снаружи отсутствуют, поэтому коэффициент теплоотдачи везде одинаков и равен $14 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$. Наружная температура $+20^\circ\text{C}$. Упрощенная конструктивная схема блока представлена на рис. 3.

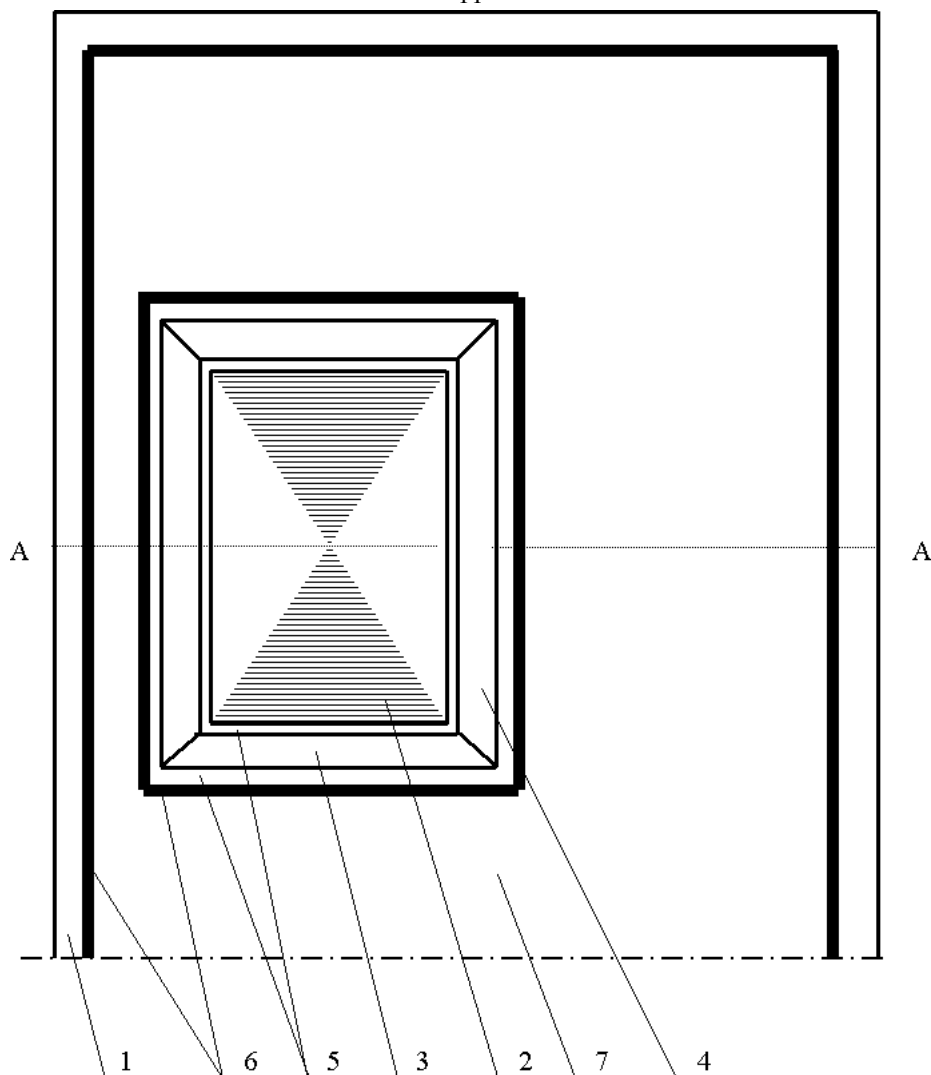


Рис 3. Упрощенная схема модели.

1. Алюминиевый закрытый корпус, метка *Aluminium*, $\lambda=220$ Вт/(К·м);
2. Сердечник, навитый из ленты толщиной 0.5 мм из стали марки 2312, метка *Steel*, $\lambda_{Fal}=\lambda_{Fz}=23$ Вт/(К·м), $\lambda_{Fcr}=\lambda_{Fr}=4$ Вт/(К·м), плотность тепловыделения 20 кВт/м³;
3. Горизонтальные участки обмотки, выполненной из провода 0.56/0.63 марки ПЭТ-155, пропитка окунанием с коэффициентом 0.2, коэффициент заполнения 0.72, метка *Cuprum Hor*, $\lambda_{Cal}=\lambda_{Cz}=168$ Вт/(К·м), $\lambda_{Ccr}=\lambda_{Cr}=0.27$ Вт/(К·м), плотность тепловыделения 60 кВт/м³;
4. Вертикальные участки этой же обмотки, метка *Cuprum Ver*, $\lambda_{Cal}=\lambda_{Cr}=168$ Вт/(К·м), $\lambda_{Ccr}=\lambda_{Cz}=0.27$ Вт/(К·м), плотность тепловыделения 60 кВт/м³;
5. Изоляция, метка *Insolation*, $\lambda=0.16$ Вт/(К·м);
6. Условный пограничный слой воздуха толщиной 1 мм, метка *VA12*, $\lambda=0.014$ Вт/(К·м);
7. Внутренний воздух, условное "сверхтеплопроводное" тело, метка *TSC*, $\lambda=10^5$ Вт/(К·м).

Необходимо обратить внимание на то, что обмотку пришлось разделить на четыре отдельных блока, поскольку отдельные её части по-разному ориентированы, для вертикальных участков продольное направление радиально, а для горизонтальных – аксиально. Пограничные слои отделены от "сверхтеплопроводного" тела изотермой (метка *Izoterm*). Из-за симметрии ось задана как граница, которую не пересекает тепловой поток (метка *BoundF0*). Наружная поверхность

обозначена как метка *BoundT20*. Решение задачи приведено на рис. 4 (распределение температуры по линии А-А).

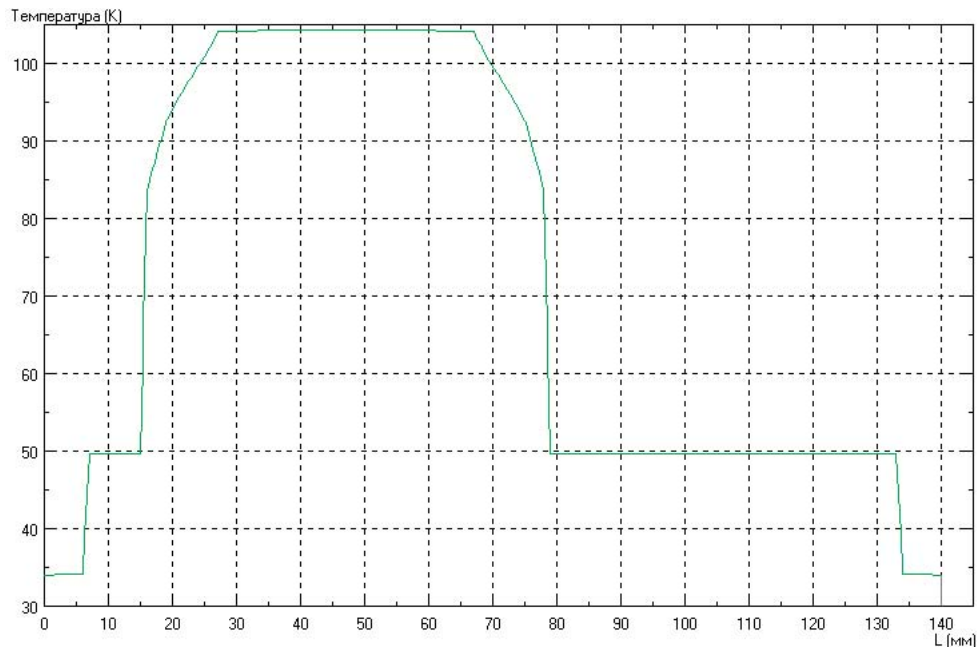


Рис. 4. Распределение температуры по линии А-А.

Литература

1. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.2. ПК "ТОР", Санкт-Петербург, 2005.
2. Счастливый Г.Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей. "Наукова думка", Киев, 1966.
3. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. "Энергия", М., 1974.
4. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока. Госэнергоиздат, М.-Л., 1961.
5. ГОСТ 14254-96. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP).
6. ГОСТ 20459-87. Машины электрические вращающиеся. Способы охлаждения. Обозначения.
7. ГОСТ 21427.0-75. Сталь электротехническая тонколистовая. Классификация и марки.
8. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. "Энергия", М., 1969.