

И.Г. Бойко, Р.И. Бойко

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННОГО УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕЖИМЕ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема и программа расчета оптимальных термических и геометрических параметров теплообменного устройства системы охлаждения электродвигателя специального изготовления, работающей в режиме паросиловой установки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электродвигатель, система охлаждения, теплообменное устройство, режим паросиловой установки.

Блок-схема і програма розрахунку оптимальних термічних і геометричних параметрів теплообмінного пристрою системи охолодження електродвигуна спеціального виготовлення, що працює в режимі паросилової установки.

К л ю ч о в і с л о в а: електродвигун, система охолодження, теплообмінний пристрій, режим паросилової установки.

Постановка проблемы. Электрический двигатель (ЭД) является системой преобразования электрической энергии в механическую, которое сопровождается потерями энергии в виде тепла. Тепловые потери могут привести к росту температуры активных частей машины выше допустимой нормы. Поэтому одним из необходимых условий надежной работы ЭД является использование теплообменных устройств (ТУ) для отвода тепловых потерь от мест их выделения в окружающую среду. Одним из условий повышения коэффициента полезного действия (КПД) двигателя может быть использование энергии тепловых потерь для полезной работы нагнетательных элементов системы охлаждения.

Для осуществления поставленной задачи необходима разработка механизма трансформации тепловой энергии в кинетическую. Такой механизм существует – система охлаждения, работающая в режиме паросиловой установки [1,2]. Для ее работы необходимы:

- а) выбор жидкого теплоносителя;
- б) проведение расчета ТУ;
- в) проведение расчета элементов паросиловой установки с учетом условий работы ЭД.

Анализ исследований и публикаций. В [1,2] приведены, в первом приближении, результаты теоретических исследований двухконтурной системы охлаждения ЭД, работающей в режиме паросиловой установки.

Анализ [3] позволил сделать выбор конструкции ТУ, принять допущения для сравнения типичного корпуса ЭД, обдуваемого потоком воздуха, с корпусом ТУ для максимального использования разработанных гидродинамических моделей при оценке эффективности систем охлаждения. Приведен алгоритм расчета геометрических параметров ТУ и температуры стенок его трубок. Однако при разработке программы расчета этих параметров, с использованием возможностей вычислительных систем, можно дополнительно учесть влияние отклонения температуры насыщенного пара от реальных ее значений, что в целом сказывается на качестве теплообмена и на геометрических размерах ТУ.

Цель статьи. Уменьшение трудоемкости и повышение качества расчета термических и геометрических параметров ТУ двухконтурной системы охлаждения ЭД специального изготовления, работающей в режиме паросиловой установки, при разных плотностях тепловых потерь.

Результаты исследований. Принципиальная схема исследуемой системы охлаждения ЭД 1 представлена на рисунке 1. При работе ЭД в любом режиме тепловые потери отбираются теплоносителем, который, преобразуясь в пар, по трубопроводу подается на турбинку 2. Она отбирает часть энергии пара, преобразуя ее в механическую энергию вентилятора. Затем пар попадает в ТУ 3, где конденсируется на внешних стенках трубок и в виде конденсата стекает в емкость с водой 4, которая охлаждается вентилятором 5, сочлененным с турбинкой. Вода, смешанная с конденсатом и охлажденная потоком воздуха, нагнетаемым вентилятором, подается насосом 6 в трубки ТУ, а насосом 7 – в теплообменник ЭД, т.е. – оба цикла замыкаются. При необходимости, для более интенсивного охлаждения жидкого теплоносителя в емкости 4, можно использовать дополнительный вентилятор-«наездник» с автономным приводом.

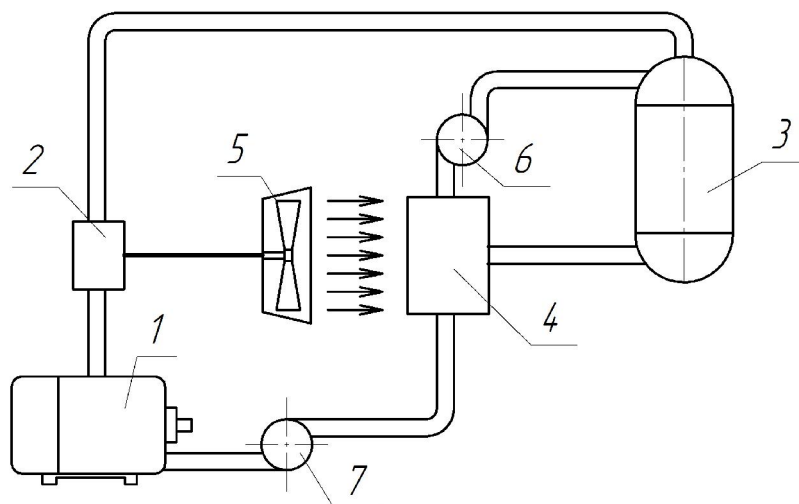


Рисунок 1 – Принципиальная схема двухконтурной системы охлаждения электродвигателя специального исполнения с жидким теплоносителем, работающей в режиме паросиловой установки

Для составления блок-схемы и программы расчета параметров ТУ примем следующие исходные данные:

- а) вид теплоносителя – вода;
- б) тип движения теплоносителя – прямоток;
- в) на выходе из ТУ конденсат теплоносителя находится при температуре t ;
- г) температура насыщения пара теплоносителя – t_s ;
- д) скорость движения теплоносителя в трубках – $v_{ж}$ и температура на входе и выходе его из ТУ – соответственно $t_{ж1}, t_{ж2}$;
- е) наружный и внутренний диаметр трубок ТУ – d_1, d_2 .

Кроме того, в нашем случае из электромагнитного расчета ЭД известны:

- а) отводимые тепловые потери P_{om} ;
- б) отводимые тепловые потери через ТУ, равные согласно термическому КПД цикла Карно[1] $P_{om1} = P_{om} - 0,18 P_{om}$.

При составлении алгоритма расчета используются уравнения теплового расчета теплообменника, приведенные в [3], основные его положения приведены в блок-схеме (рисунок 2).

Определим коэффициент теплопроводности стенок трубок λ_l , в полости которых подается жидкий теплоноситель. После проведенных операций с физическими величинами составим блок-схему метода теплового расчета ТУ с использованием вычислительных систем.

Критерии и обозначения в блок-схеме работы метода:

а) из таблиц Е.Д.Краснощечкова (1975г.) находим значения коэффициентов А и В по известной t_s и определяем приведенную длину трубок Z

$$Z = (t_s - t_{c2})H \cdot A;$$

$$A = \left(\frac{g}{v^2} \right)^{1/3} \cdot \frac{\lambda}{\gamma \cdot \rho \cdot v};$$

$$B = \frac{4}{\gamma \cdot \rho \cdot v},$$

где λ, v, ρ – коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и плотности конденсата при температуре t_s ; γ – теплота парообразования;

б) теплофизические свойства теплоносителя

$$v_{жс}, \lambda_{жс}, \rho_{жс} \text{ и } P_{гжс} = v_{жс} / a,$$

где a – коэффициент температуропроводности;

- в) G_1, G_2 – расход соответственно жидкого теплоносителя и пара;
- г) критерий Прандтля $P_{гжс}, P_{гс}$ (из таблиц при средней температуре теплоносителя и стенки соответственно);
- д) среднелогарифмический температурный напор

$$\Delta t_{лс} = \frac{t_{жс2} - t_{жс1}}{2,31 \lg \frac{t_s - t_{жс1}}{t_s - t_{жс2}}};$$

е) критерий Нуссельта $Nu_{жс} = \frac{\alpha_{жс} d}{\lambda_{жс}},$

где $\alpha_{жс}, \lambda_{жс}, d$ – коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопроводности и линейный размер соответственно;

ж) H – высота трубок ТУ.

Предпосылками к разработке программного обеспечения (ПО), реализующего метод последовательных приближений, при расчёте термических и геометрических параметров ТУ системы охлаждения ЭД, работающей в режиме паросиловой установки, стали очевидные преимущества в проведении объёмных вычислений при помощи вычислительных систем. Значительный прогресс в сфере информационных технологий и в реализации математических моделей при помощи компьютеров в других сферах деятельности человека, привели к мысли, что применение мощности вычислительных систем к данной задаче оправдывает себя, сэкономив время и трудовые затраты, необходимые бы для проведения расчётов подобного рода вручную.

Необходимые требования к ПО. В соответствии с предпосылками к разработке ПО, реализующего алгоритм расчета термических и геометрических параметров ТУ, к конечному продукту расчета предъявлены следующие требования:

а) так как конечная программа реализует алгоритм расчёта параметров ТУ системы охлаждения ЭД, результаты которого используются для создания реальных моделей, в первую очередь от программы, естественно, требуется безотказная работа и предельная точность вычислений, чтобы, насколько это возможно, минимизировать погрешность вычислений теоретического метода;

б) не менее важным требованием является удобство и простота в работе с программным комплексом (эффективность его конечного интерфейса), так как создание программ, для работы с которыми требуется дополнительная подготовка и значительные затраты времени, неэффективно;

в) гибкость конечной реализации программы, возможность ее применения не только в системах «пользователь-интерфейс», но и в полностью автоматических системах, то есть возможность последующего использования данного решения для создания более обширных комплексов программ;

г) менее важным, но всё же ощутимым требованием, есть эффективность реализации алгоритма (скорость работы конечного продукта);

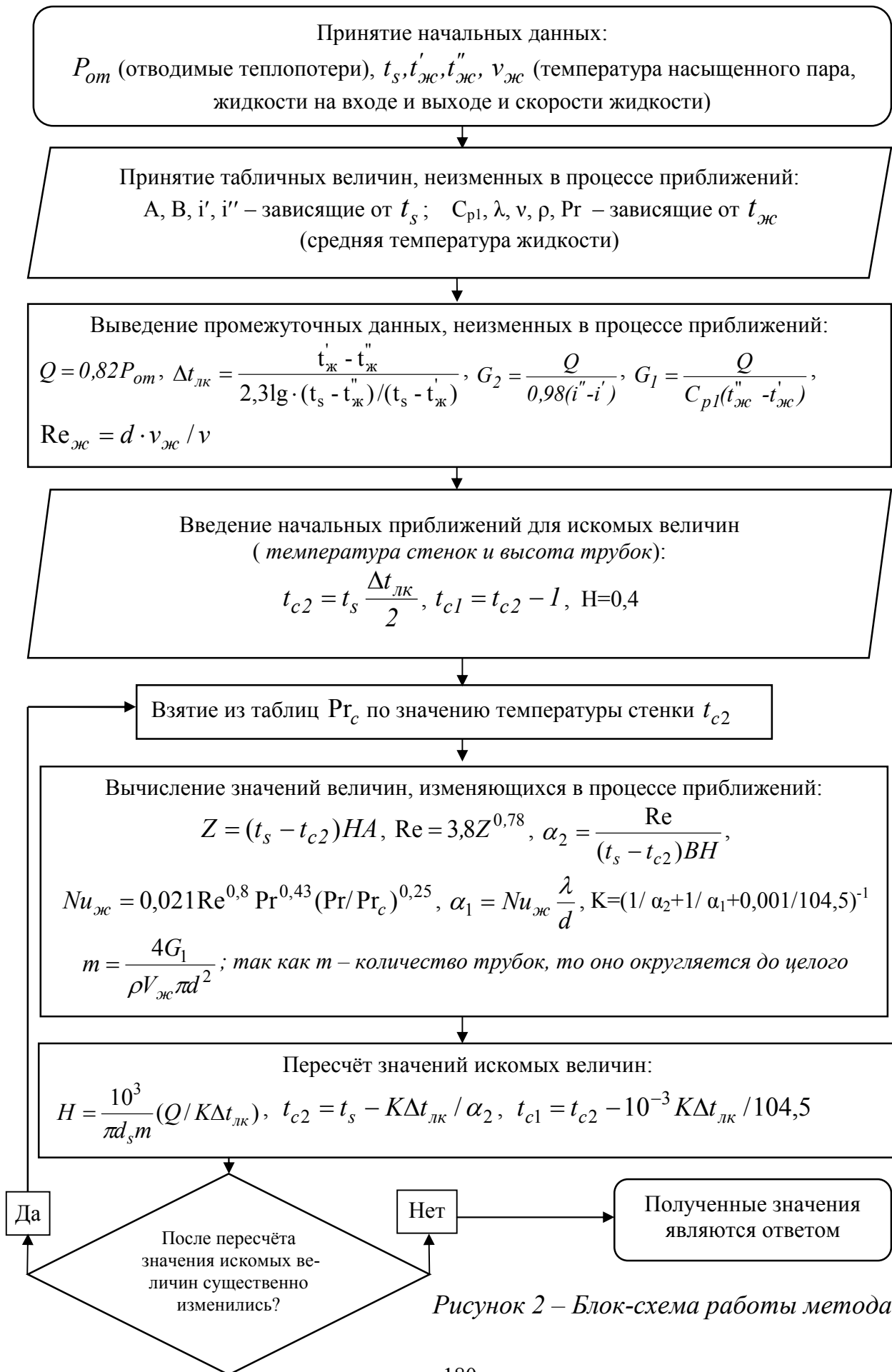


Рисунок 2 – Блок-схема работы метода

д) оптимальность использования памяти, что в условиях крайней дешевизны внутренней оперативной памяти для современных устройств не является критически важным требованием, но может обеспечить большую совместимость с вычислительными машинами более ранних поколений.

Идейная реализация ПО. В первую очередь стоит заметить, что реализуемый метод, очевидно, алгоритмируем, а значит, может быть представлен в виде конечной программы, что позволяет сразу переходить к описанию ряда решений, принятых для выполнения поставленных требований, и некоторых оптимизаций в целом.

Чтобы обеспечить достаточную надёжность и точность, весь метод был детально проанализирован и, где это возможно, полностью пересмотрены формулы получения значений большинства используемых переменных. Полностью изменён подход к порядку вычислений. Если для ручного метода удобнее и логичнее рассчитывать значения используемых переменных в порядке их логического следования, то для машинной реализации такой метод не только не эффективен, но и может принести отрицательный эффект. Поэтому все вычисления были перегруппированы в порядке технической необходимости их определения, а от некоторых значений пришлось в принципе отказаться и вместо них использовать прямые алгоритмы их расчета. Сами же формулы были оптимизированы, чтобы уменьшить погрешность вычислений: значения определялись так, чтобы минимизировать влияние конечности хранимых разрядов и тем самым исключить риск сбоя из-за переполнения разрядной сетки. Используя такой метод представления и обработки данных, уже давно проверенный на практике, удалось обеспечить достаточную точность и, главное, надёжность конечного алгоритма, а также избавиться от излишних пересчётов значений величин, что, естественно, намного увеличивает скорость работы программы.

Проблемой стала необходимость постоянно использовать значительный объём данных из таблиц, однако это может быть автоматизировано. Поэтому таблицы, необходимые для работы метода, были интерполированы формулами Лагранжа и сформулированы как функции от соответствующих переменных. Используя такое достаточно простое решение, удалось избавиться от необходимости вводить большие объёмы данных, а главное – уменьшить шанс ошибиться при их вводе, что, несомненно, увеличивает надёжность решения задачи.

Чтобы обеспечить условие гибкости конечного результата, достаточно отделить метод и обслуживающие функции от интерфейса, а полученные модули сделать максимально автономными. В результате создана библиотека решений, которую впоследствии можно агрегировать с другими методами и программами.

Для возможности потокового отслеживания результатов вычислений интерфейс предусматривает выведение промежуточных результатов, получаемых в процессе приближений.

Программная реализация. Для конкретного написания программного комплекса был выбран язык С++ как самый распространенный и эффективный среди равных. Все дробные переменные решено хранить в типе «double», то есть представлять в виде мантиссы около 16 знаков числа и хранить порядок данного числа, так как точности, обеспечиваемой подобным методом хранения, более чем достаточно. Всё решение было инкапсулировано в автономный хедер-файл для использования в последующих программных комплексах.

Интерфейс предполагает возможность вводить и выводить входные данные как из файлов (для обработки больших массивов данных), так и через консоль. Естественным решением было снабдить для ясности консольный режим всеми необходимыми комментариями и функциями проверки введённых данных на корректность (на вводимые величины наложены ограничения диапазона значений, в соответствии с их физической интерпретацией).

Оценка результатов. Анализируя полученный программный комплекс, можно сказать, что все поставленные задачи были выполнены. Очевидным достоинством такого подхода стала его скорость, простота и надёжность. Недостатком, на наш взгляд, есть относительная локальность задачи, тем не менее, этот недостаток не критичен, так как полученное решение может быть применено как часть более обширного программного комплекса.

В результате первых же тестов оказалось, что точность, обеспечиваемая машинными вычислениями, весомо влияет на ход построения приближений. Так, например, в контрольном примере при ручном пересчете с округлением до шести знаков после запятой в первом приближении для ТУ оказывалась необходимой одна трубка длиной чуть менее метра, машинный же метод давал две полуметровых трубки, причём дальнейшие итерации влияли только на второй и более знаки после точки.

Таблица 1

№	$V_{жс} = 0,5 \text{ м/с}$				$t_{жс1} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$			
	$P_{отг},$ кВт	$P_{от1},$ кВт	$t_{с1},$ $^\circ\text{C}$	$t_{с2},$ $^\circ\text{C}$	$H,$ м	$m,$ шт	$t_{ж2},$ $^\circ\text{C}$	$t_s,$ $^\circ\text{C}$
1	10	8,2	122,1	124,2	0,745	1	85	150
2	9	7,38	114,6	116,5	0,73	1	80	140
3	8	6,56	103	105	0,314	1	75	130
4	7	5,47	98,1	99,8	0,329	2	70	120

Как следует из результатов расчета (таблица 1), применение ПО дает возможность получить оптимальные термические и геометрические параметры ТУ при изменении условий работы системы охлаждения ЭД. Кроме того, обеспечена наглядность габаритных размеров ТУ и соизмеримость их с габаритными размерами ЭД, что является важным элементом при проектировании системы охлаждения.

Выводы:

1. Разработаны блок-схема и программа расчета ТУ системы охлаждения ЭД специального исполнения, работающей в режиме паросиловой установки.

2. Программа дает возможность определить оптимальные соотношения термических и геометрических параметров теплообменного устройства при разной плотности тепловых потерь и расходе теплоносителя, что подтверждено проведенными расчетами.

3. С помощью программы значительно уменьшается трудоемкость расчета и увеличивается его точность.

4. Интерфейс ПО предполагает возможность вводить и выводить входные данные как из файлов (для обработки больших массивов данных), так и через консоль.

5. Для возможности потокового отслеживания результатов вычислений интерфейс предусматривает выведение промежуточных результатов, получаемых в процессе приближений.

Список литературы

1. Использование части энергии тепловых потерь электрической машины для интенсификации ее системы охлаждения / Бойко И.Г., Ткачук Н.Н., Омельченко А.Н., Шихова Л.К. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2006. – С.236-245.

2. Декларацийний патент на корисну модель №18282 Україна, МКИ Н02К 9/20. Система випарного охолодження /Бойко І.Г., Ткачук М.М., Омельченко О.М., Ткачук О.М. (Україна). – Заявл.20.03.06; опубл. 15.11.06. Бюл. № 11.

3. Тепловой расчет теплообменника системы охлаждения электродвигателя специального исполнения, работающей в режиме паросиловой установки / Бойко И.Г., Омельченко А.Н., Красников Г.В., Ксензенко В.В., Рипула В.Н. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб.науч.тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С.162-170.