

УДК 621.314.262:536.7.001.37

*Канд. техн. наук, доц. Заблодский Н.Н.
Канд. техн. наук, доц. Плюгин В.Е.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ ПРИ НЕПОДВИЖНОМ РОТОРЕ

Наведені результати теоретичних досліджень, отримані залежності, які описують зміни електромагнітних параметрів від температури та у часі для пускового режиму та тривалої стоянки під струмом електротепломеханічних перетворювачів енергії заглибного типу.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Переработка сырья в нефтехимической промышленности связана с энергоемкими технологическими процессами и комплексами оборудования, использующих пар для создания тепловых режимов. Эффективность использования таких комплексов в настоящее время резко снижается из-за роста цен на энергоносители. Кроме того, современные системы электроприводов, включая механизмы редукции, имеют низкий КПД и бесполезно отдают тепловую энергию в окружающую среду. Разумной альтернативой существующим комплексам асинхронный двигатель–исполнительный механизм могут стать электротепломеханические преобразователи энергии (ЭТМП) технологического назначения, обладающие полифункциональными и теплоинтегрирующими свойствами.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время разработаны основные принципы и методология создания, а также изготовлен ряд конструктивных модификаций ЭТМП шнекового и погружного типов [1-4]. Вместе с тем, сложность описания взаимосвязанных тепловых и электромагнитных процессов, необходимость координации потоков энергии, а также наличие нетрадиционных для современных асинхронных машин режимов, таких как длительная стоянка под током и работа при больших скольжениях, требует глубоких теоретических и экспериментальных исследований. Особое значение имеет исследование электромагнитных и тепловых переходных процессов.

Постановки задачи. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов ЭТМП погружного шипа при включении в сеть и длительной стоянке под током.

Разработанная в [3] обобщенная математическая модель (ММ) ЭТМП и ее численная реализация в пакете программ FemLab применяется для ЭТМП различного технологического назначения. Вместе с тем, ряд конструктивных исполнений ЭТМП погружного типа вносят новые элементы в структуру и компоновку активных зон. Это требует соответствующих модификаций ММ на основе принципов пространственной и электромагнитной инверсии, скрещивания и репликации.

Наиболее яркой композицией обладает бистаторное исполнение погружного ЭТМП. Полевой анализ выполняем для расчетных областей, показанных на рис. 1.

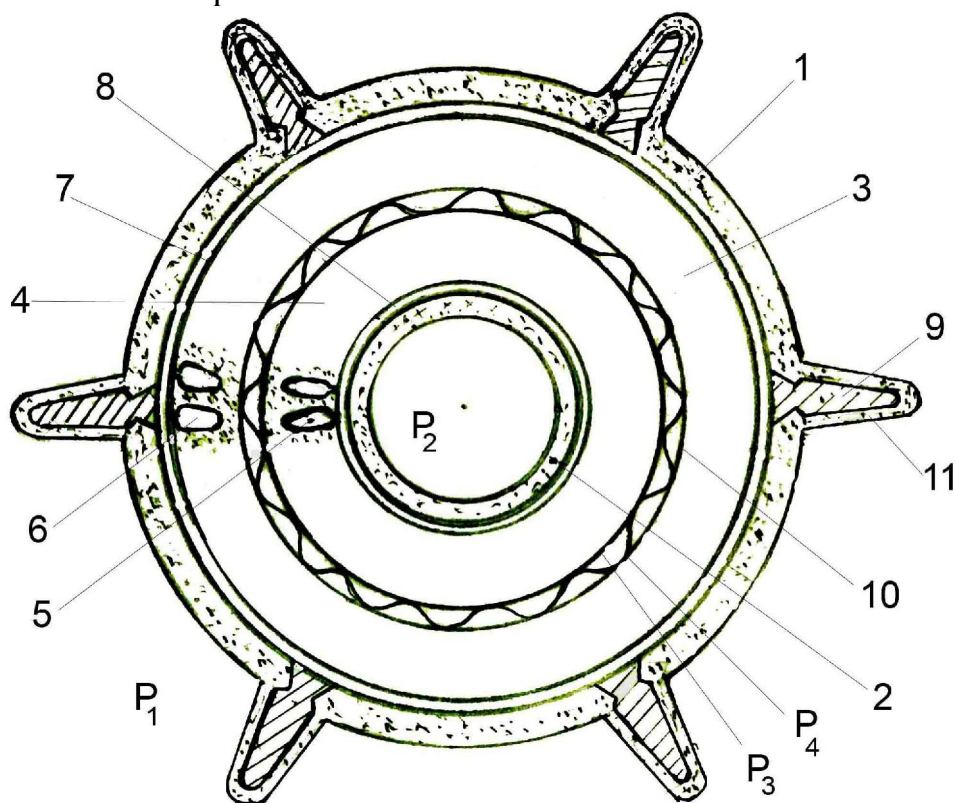


Рисунок 1 – Поперечное сечение погружного ЭТМП:

1- внешний ротор; 2 – внутренний ротор; 3 – внешний статор; 4 – внутренний статор; 5 – полузакрытые пазы внутреннего статора; 6 – полузакрытые пазы внешнего статора; 7 – внешний воздушный зазор; 8 – внутренний воздушный зазор; 9 – стержень КЗ обмотки; 10 – опорный гофрированный цилиндр; 11 – перемешивающие лопатки.

Внутренний и внешний статоры ЭТМП содержат пазы с трехфазной обмоткой, а ярма каждого из статоров плотно посажены на коаксиально установленный гофрированный опорный цилиндр.

Внешний массивный ротор содержит дополнительную короткозамкнутую (КЗ) обмотку, стержни которой установлены внутри пере-

мешивающих лопаток [4]. Внутренний и внешний роторы ЭТМП могут вращаться обособленно либо иметь между собой жесткое соединение в нижней торцевой части. Отличная от нуля электропроводимость задается только в массивных роторах, а также в КЗ обмотке ЭТМП.

Источники поля – сторонние плотности токов задаются в сечениях пазов внутреннего и внешнего статоров в соответствии со схемами обмоток. Для вращательного движения роторов линейные скорости в каждой точке выражаются в общем случае через разные угловые частоты вращения внешнего ω_{R1} и внутреннего ω_{R2} роторов. При анализе двумерного поля в поперечном сечении ЭТМП в декартовой системе координат векторный магнитный потенциал имеет только одну осевую составляющую и дифференциальное уравнение электромагнитного поля в частных производных относительно векторно-магнитного потенциала имеет вид [3]:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \gamma \frac{\partial A_z}{\partial t} - \gamma \left(v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{z\text{стоп}} \quad (1)$$

Уравнение (1) дополняется граничными условиями – значением векторного магнитного потенциала на внешних границах расчетных областей, отображающих активную зону внутреннего и внешнего модулей – поверхности $P_1 - P_4$. На этих поверхностях задаем однородные граничные условия первого рода $A(x, y, t)|_{P1-P4} = 0$.

При анализе динамических режимов, в данном случае пуска, задаем однородное начальное условие $A_0(x, y, t_0) = 0$.

Результаты расчета поля векторного магнитного потенциала являются исходными данными для расчета магнитных потокосцеплений статоров, роторов и главных потокосцеплений ЭТМП.

В каждой точке ротора удельные потери определяются по выражению

$$Q = J_z^2 / \gamma(T), \quad (2)$$

где электропроводность металла ротора в каждой его точке зависит от температуры T по закону $\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha T)$.

Режимы работы погружного ЭТМП формируются технологическим циклом переработки легкоплавкого вещества. Рассмотрим одну из реализаций технологического цикла: плавление застывшего материала в резервуаре – дозированный отбор и транспортировка расплавленного материала к напорному патрубку для дальнейшего использования. В со-

ответствии с этим работа ЭТМП формируется в такую последовательность процессов преобразования электрической энергии:

- электромагнитный переходный процесс включения в сеть при заторможенном роторе (на выходе – тепловая энергия);
- длительная стоянка под током (режим короткого замыкания);
- переходный процесс разгона ротора до установившейся частоты вращения;
- перемещение вращающегося ЭТМП в резервуаре при хаотически возникающих пиках нагрузки.

Длительность указанных процессов определяется электромагнитными и электромеханическими постоянными ЭТМП, а также теплофизическими и реологическими свойствами материала.

Электромагнитный переходный процесс включения в сеть. ЭТМП погружен в резервуар с застывшим материалом, поэтому ротор находится в заторможенном состоянии. Численная реализация ММ методом конечных элементов с использованием пакета программ FEMLAB позволяет оценить распределение магнитного поля, плотностей тока, удельных потерь и температур не только в массивных ферромагнитных зонах ротора ЭТМП, но и в алюминиевых (медных) стержнях КЗ обмотки. В течение переходного процесса меняется температура и в значительной степени модуль и фаза отдельных элементов КЗ обмотки. На рис. 2 представлены результаты моделирования в конце 14-секундного режима короткого замыкания для алюминиевого стержня обмотки. Наиболее интенсивное изменение плотностей тока и температуры происходит в первый момент после включения ЭТМП (1 - 3 с). На рис. 3 показаны графики изменений плотностей тока в отдельных элементах. В начале режима нагревается только элемент 1. Это, естественно, приводит к увеличению активного сопротивления этого элемента и соответствующему перераспределению тока стержня: ток элемента 1 уменьшается, токи элементов 2 и 3 растут. Подобный алгоритм изменений происходит в течение переходного процесса и с остальными элементами.

Как показывает анализ, в элементах 6, 7 стержня ротора ток практически отсутствует, а нестационарное температурное поле стержня определяется в основном потерями в отдельных его элементах и перераспределением тепла за счет теплопроводности, как в массиве стержня, так и между массивами смежных ферромагнитных областей и алюминиевым стержнем.

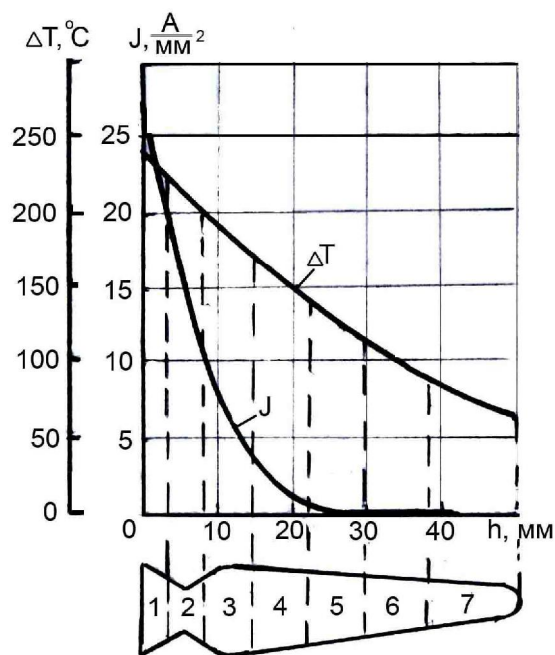


Рисунок 2 – Распределение плотности тока и превышений температуры стержня КЗ обмотки ротора погружного ЭТМП.

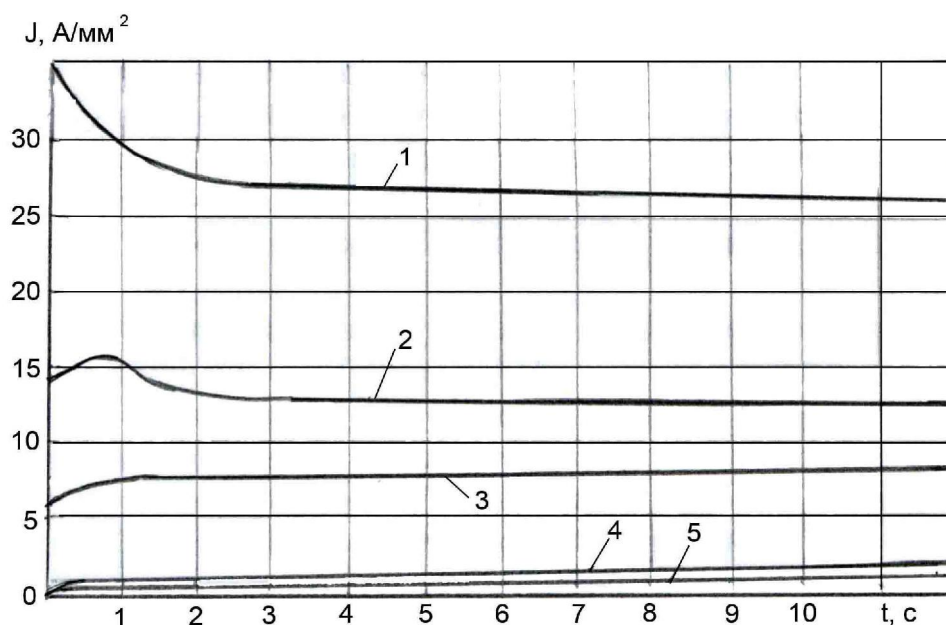


Рисунок 3 – Изменение плотности тока в элементах КЗ обмотки ротора погружного ЭТМП.

В условиях длительного нахождения ротора ЭТМП в заторможенном состоянии после момента включения исследованы изменения модулей и угловой скорости главного потокосцепления, потокосцеплений статора и ротора, а также знакопеременных электромагнитных переходных моментов внутреннего и внешнего модулей. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

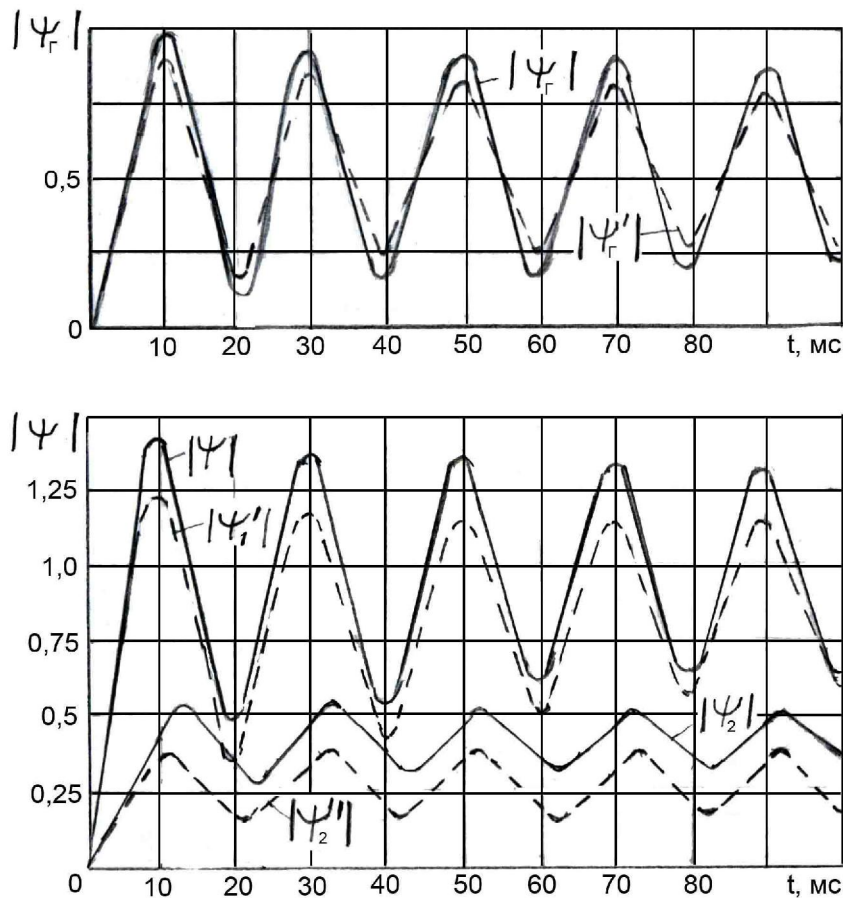


Рисунок 4 – Изменение потокосцеплений внешнего модуля погружного ЭТМП:

- - массивный ротор с алюминиевой КЗ обмоткой внутри лопаток;
- — — - массивный ротор с ферромагнитными лопатками.

Исследованы два варианта исполнения ротора ЭТМП: цилиндр и лопатки внешнего ротора выполнены из ферромагнитного материала; внешний ротор содержит КЗ обмотку, размещенную внутри лопаток (см. рис. 1). В момент включения ЭТМП в сеть вектор вынужденной составляющей главного потока $\bar{\Psi}_{ГВ}$ отстает от начального положения вектора питающего напряжения на угол 90° . Вектор свободной составляющей главного потока $\bar{\Psi}_{ГСВ}$ равен по модулю $\bar{\Psi}_{ГВ}$, но противоположен ему по направлению. Характер поведения электромагнитного момента при заторможенном роторе определяется изменяющимися значениями потокосцепления $\bar{\Psi}_2$ и эквивалентного активного сопротивления

R_2 роторе по известному выражению:
$$M = -I_m \left(\frac{\bar{\Psi}_2^* d\bar{\Psi}_2}{R_2 dt} \right).$$

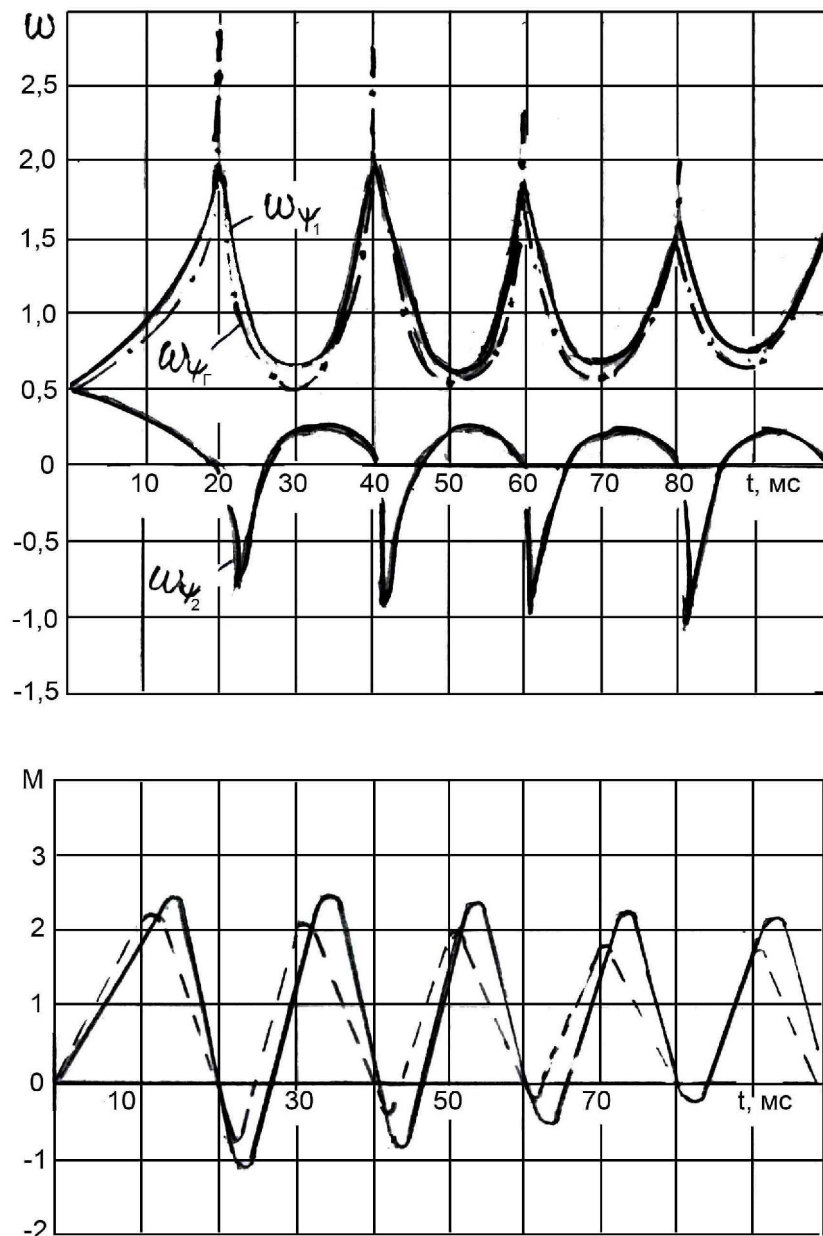


Рисунок 5 – Изменения угловых скоростей потокоцеплений и электромагнитных моментов внешнего модуля погружного ЭТП:

- — — — — - массивный ротор с КЗ обмоткой;
- — — — — - массивный ротор с ферромагнитными лопатками.

За базовые значения исследуемых величин приняты следующие: синхронная скорость магнитного поля ω_1 ; номинальные значения $|\Psi_n|$ и M_n внешнего модуля с массивным ротором и КЗ обмоткой, размещенной внутри лопаток.

Общая продолжительность переходных процессов от включения в сеть до момента установившихся значений составляет 0,95 с. Амплитуды, фазовый сдвиг и длительность затухания исследуемых величин в

случае массивного ротора без КЗ обмотки существенно меньше, чем при ее наличии. Начальная угловая скорость потокосцеплений составляет половину от синхронной.

Характер изменения амплитуд и угловой скорости результирующего потокосцепления $\Omega_{\psi\Gamma}$ определяется взаимным положением свободной и вынужденной составляющих потокосцепления. При этом свободная составляющая периодически (в конце и начале периода) ускоряет угловое перемещение главного потокосцепления в 2-2,5 раза.

Длительная стоянка под током ($s=1$). Уровень напряжения для питания статоров ЭТМП должен устанавливаться плавно или ступенчато в соответствии с допустимой скоростью нагрева изоляционных композиций статоров. Контроль температурного режима по скорости нагрева осуществляется температурными датчиками, установленными в лобовых частях статоров, а диагностика состояния изоляции выполняется с помощью аналого-цифровой диагностической системы контроля изоляции электромеханических устройств.

Длительность режима стоянки под током определяется временем нагрева до температуры плавления объема материала, находящегося в межлопаточном пространстве внешнего ротора. Сокращение этого времени возможно путем повышения уровня питающего напряжения и интенсификации внутреннего теплообмена ЭТМП в соответствии с двумя способами (либо их сочетанием):

а) использование воздушного охлаждения, при этом охлаждающий воздух встречными потоками проходит в междустаторном канале (см. рис. 1) и с помощью коллектора направляется в рубашку напорного патрубка. Тепло, приобретенное от активных частей статоров, используется для поддержания необходимой температуры в тракте дозированного отбора расплавленного материала;

б) использование скрытой теплоты плавления хладагента, в качестве которого возможно использование легкоплавкого вещества, например, парафина, заполняющего весь внутренний объем ЭТМП.

При выборе значений коэффициентов теплоотдачи, необходимых для задания граничных условий третьего рода в случае применения воздушного охлаждения, воспользуемся экспериментальными значениями коэффициента теплоотдачи в каналах между поверхностями P_3 и P_4 – 130-170 (Вт/м²·град.). Для поверхностей P_1 , P_2 в расчетах распределения теплового поля в материале используем коэффициент температуропроводности, базируясь на дифференциальном уравнении, являющимся обобщением метода конечных разностей Шмидта и метода элементарных балансов [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Приток тепловой энергии в перерабатываемый материал в течение определенного времени сопровождается повышением температуры, достигающей в прилегающих к ротору ЭТМП слоях уровня фазового перехода – плавления. При этом принимается допущение о квазистационарности температурного режима в этих слоях.

Решение задачи с фазовыми превращениями выполняется на основе уравнения теплового баланса и сводится к решению осесимметричной задаче Стефана [2]:

$$\left. \begin{aligned} \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad r_0 < r < r = y(t); \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} &= q_s; \\ T[y(t), t] &= T_L = const; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=y(t)} &= \alpha (T_L - T_c) + \rho \cdot Q \cdot y'; \\ y(0) &= r_0, \end{aligned} \right\} (4)$$

где α - коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела фаз;
 ρ, c, λ - соответственно плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности расплава;

q_s – плотность теплового потока на поверхности ротора ЭТМП;

$y' = dy / dt$ – скорость движения границы фаз;

T_L – температура на границе раздела фаз.

Результаты расчета представлены на рис. 6.

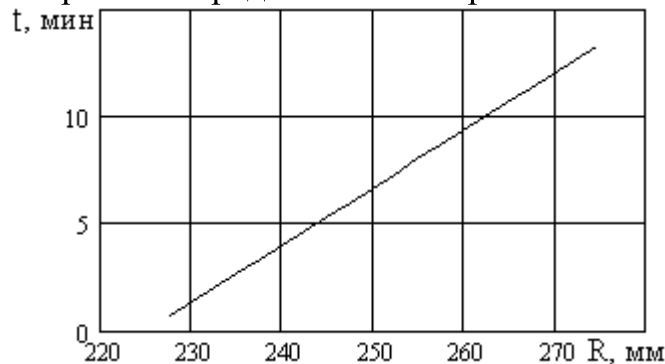


Рисунок 6 – Расчетное время плавления при изменении радиуса границы жидкой фазы материала.

Выводы.

1. На основе математической модели погружного ЭТМП получены временные зависимости основных электромагнитных величин для переходных процессов включения в сеть. Установлено, что угловая скорость магнитных потокосцеплений в момент пуска составляет половину величины синхронной скорости.

2. Установлен механизм перераспределения плотностей тока и температуры для КЗ обмотки погружного ЭТМП при заторможенном роторе.

3. Для режима длительной стоянки под током разработана математическая модель взаимодействия ЭТМП с нагрузочно-охлаждающей средой, позволяющая определить скорость перемещения границы фазового перехода и время начала вращения ротора.

Приведены результаты теоретических исследований, получены зависимости, которые описывают изменения электромагнитных параметров от температуры и времени для пускового режима и длительной стоянки под током электромеханических преобразователей энергии погружного типа.

Results of theoretical researches are resulted, dependences which describe changes of electromagnetic parameters from temperature and time for a starting mode and long parking under a current of electromechanical converters of energy of submersible type are received.

Библиографический список.

1. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Проектирование электромеханических преобразователей энергии для переработки сыпучих материалов // *Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки», частина 1.* – 2006. – С. 106 – 111.

2. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Учет фазового перехода при моделировании теплового поля электромеханического нагревателя в среде легкоплавкого материала // *Вісник СНУ.* – Луганськ. – 2002. - № 4. - С. 175 – 179.

3. Заблодский Н.Н. Исследование распределения электромагнитных и тепловых полей в электротепломеханических преобразователях энергии // *Сб. научн. трудов ДонГТУ. Вып. 21 – Алчевск: ДонГТУ, 2006.* – С. 231 – 248.

4. Патент України: 75771, Н05В 6/10. Заглибний електронагрівач / М. М Заблодський., В. Ф. Шинкаренко, В. Є. Плюгін та інші. – Бюл. № 5. – 2006.