

Электротехника

УДК 621.365

Л.С. Зимин, А.Г. Сорокин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАСТМАССЫ

Посредством метода конечных элементов исследованы электромагнитные и тепловые поля в системе «индуктор – цилиндр пластикации – полимерный материал – шнек». Приведены результаты расчета на численной модели. Математическая модель индукционного нагревателя ориентирована на решение задач проектирования индукционных систем для нагрева полимерных материалов.

Рассматриваемый объект представляет собой теплообменный аппарат, состоящий из полого цилиндра пластикации и расположенного внутри него шнека (рис. 1.) Нагрев полимерного материала происходит за счет теплообмена со стенками и шнеком теплообменного аппарата, в которых индуцируются вихревые токи охватывающим их индуктором.

Здесь q_1 – тепловой поток от стенки цилиндра пластикации в окружающую среду, q_2 – тепловой поток от стенки цилиндра пластикации в полимерный материал, q_3 – тепловой поток от шнека в полимерный материал, h_1 – радиус шнека, h_2 – толщина слоя полимерного материала, h_3 – толщина стенки цилиндра пластикации, L – длина нагреваемого участка и индуктора.

Для составления целостной картины изменения характера распределения плотности тока и мощности в цилиндре пластикации и шнеке в процессе нагрева и возможности аналитического описания функции распределения внутренних источников тепла требуется последовательное решение электромагнитной и тепловой задач. Разделение во времени процедур расчета электромагнитного поля и теплового поля объясняется разной инерционностью этих процессов. Поэтому электромагнитная задача может быть сформулирована как квазистационарная, а тепловая имеет в дифференциальном уравнении временную производную первого порядка. Все это позволяет создать полностью или частично независимые процедуры расчетов электромагнитных и тепловых полей. Модели, которые учитывают взаимное влияние электромагнитного и температурного полей в процессе нагрева, называются электротепловыми. Такие модели дают исчерпывающую характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника питания и выделения ее в нагрузку.

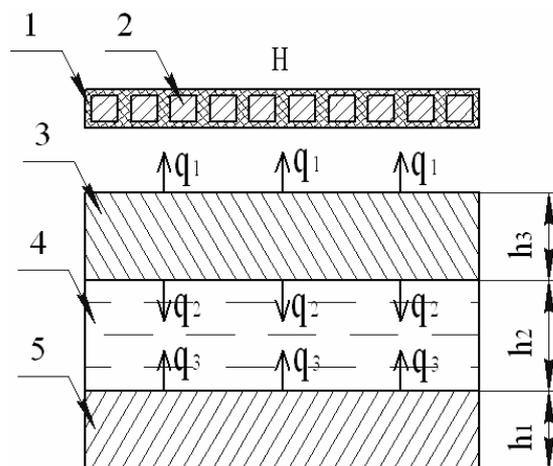
В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейными уравнениями Максвелла для электромагнитного поля с соответствующими краевыми условиями [1, 2]:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \frac{1}{\rho} E + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \dot{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \dot{H} = 0; \quad \operatorname{div} \dot{E} = 0. \quad (1)$$

Здесь \dot{H} , \dot{B} , \dot{E} , \dot{D} – векторы напряженности и индукции магнитного и электрического полей.

Исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной области [1, 2]:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \dot{A} \right) + \gamma \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = \dot{J}_0; \quad \operatorname{rot} \dot{A} = \dot{B}; \quad \operatorname{div} \dot{A} = 0. \quad (2)$$



Р и с. 1. Электротепловая задача:
1 – изоляция витков индуктора, 2 – индуктор,
3 – стенка цилиндра пластикации, 4 – слой полимерного материала, 5 – шнек

Здесь \dot{A} - векторный потенциал, μ_a - абсолютная магнитная проницаемость среды, \dot{J} - удельная электрическая проводимость.

Принимая во внимание осевую симметрию и квазистационарность исследуемого поля, уравнение (2) можно представить для комплексной амплитуды векторного потенциала в виде

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu_a(r, z)} \cdot \frac{\partial \dot{A}(r, z)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a(r, z)} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \dot{A}(r, z)}{\partial z} \right] - j\omega\gamma \dot{A}(r, z) - \dot{J}_0(r, z) = 0. \quad (3)$$

В качестве граничных условий для определенности задачи примем наиболее общие условия - равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области, находящейся в бесконечности. В реальной ситуации граница области должна быть достаточно удалена от источников тока, где магнитная энергия поля действительно падает до нуля. В плоскостях геометрической симметрии полагается перпендикулярность линий потока этим плоскостям:

$$\dot{A} \Big|_{S_1 \in S} = 0; \quad \frac{\partial \dot{A}}{\partial n} \Big|_{S_2 \in S} = 0. \quad (4)$$

Здесь S_1 – удаленная граница области Q . S_2 – граница плоскостей симметрии.

Последующая идеология расчета основывается на вариационных принципах, когда решение краевой задачи ищется путем минимизации нелинейного функционала, выражающего энергию электромагнитного поля [1, 2]:

$$F(\dot{A}) = \frac{1}{2} \iint_Q \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial \dot{A}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_a r} \right) \frac{\partial r \dot{A}}{\partial r} \right] dr dx + \frac{1}{2} \iint_Q j\omega\gamma |\dot{A}|^2 dr dx + \frac{1}{2} \iint_Q \dot{J}_0 \cdot \dot{A} dr dx. \quad (5)$$

Указанная постановка задачи охватывает самые общие электромагнитные явления и позволяет рассчитывать практически весь класс устройств индукционного нагрева, который может быть математически описан двумерным уравнением Пуассона. Сущность подхода, основанного на методе конечных элементов, заключается в исследовании глобальной функции процесса, в данном случае векторного потенциала, в дискретных частях анализируемой области Q , которая должна быть предварительно разбита на конечные смежные подобласти, что позволяет свести задачу с бесконечным числом степеней свободы к задаче, содержащей конечное число параметров. При этом внутри подобластей искомая функция интерполируется степенными полиномами, сшивается на границах контакта элементов, и при условии малости геометрических размеров последних (число элементов стремится к бесконечности) оказывается решением уравнений в частных производных типа (3). Далее с целью определения требуемого шага сетки осуществляется более мелкое дробление сегментов на элементы с помощью задания радиуса окружностей в конкретных точках. В результате разбиения область Q покрывается сеткой конечных элементов. Причем густота сетки увеличивается в местах, где ожидаются более высокие градиенты электромагнитного поля.

Автоматическое построение сетки конечных элементов произведено с помощью пакетов ELCUT 5.2 и FEMLAB, учитывающих специфику поставленной задачи и предварительно группирующих в области отдельные сегменты, форма которых глобально отображает конфигурацию исследуемой системы.

На рис. 2 показана сетка конечно-элементной модели, аппроксимируемой индукционной нагревательной системой. Результаты решения электромагнитной задачи в программе FEMLAB представлены на рис. 2, 3.

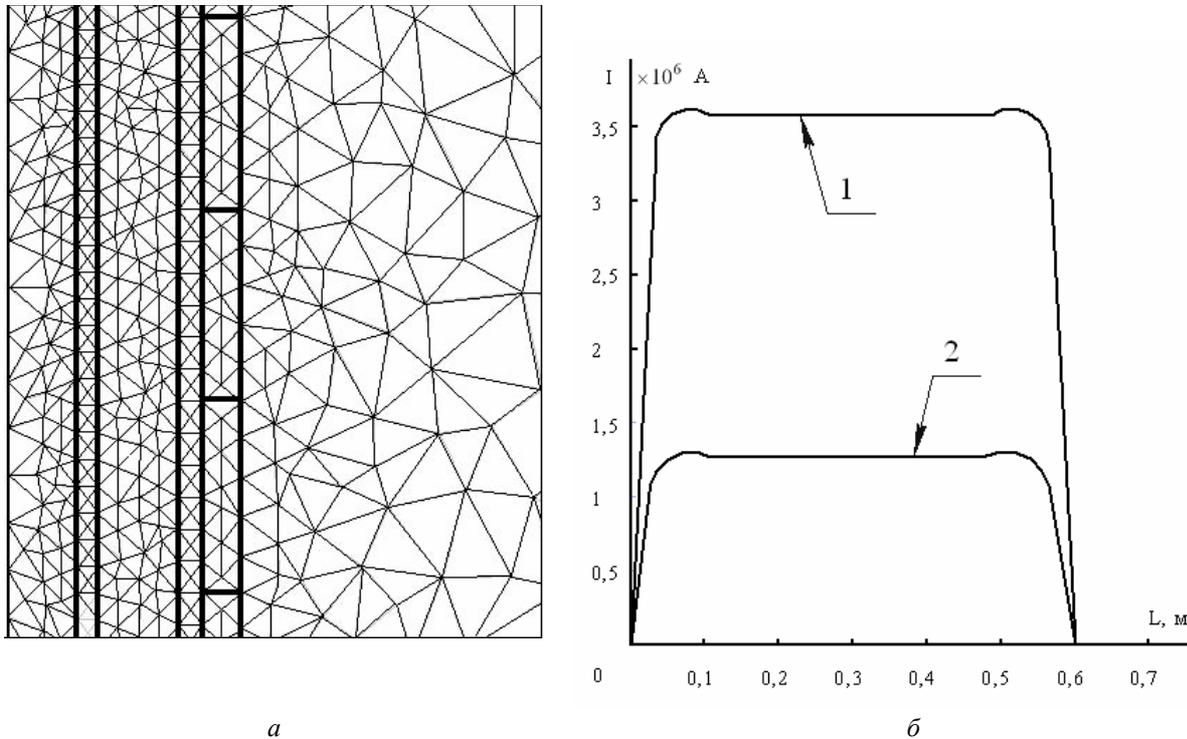
Проведенный анализ полученных результатов показывает, что при нагреве полимерного материала от цилиндра пластикации и шнека одновременно существенно сокращается время нагрева, от которого зависит расход электроэнергии.

Следующим этапом исследования является разработка математической модели тепловых процессов в сложной физически неоднородной среде. Характер распределения и удельная плотность мощности внутренних источников тепла определены в результате решения электромагнитной задачи. По причине того, что по длине индуктора не происходит значимых изменений электрических параметров системы, необходимо рассматривать задачу в двумерной постановке. Поэтому математическая формулировка задачи приводится к системе линейных дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности [3]:

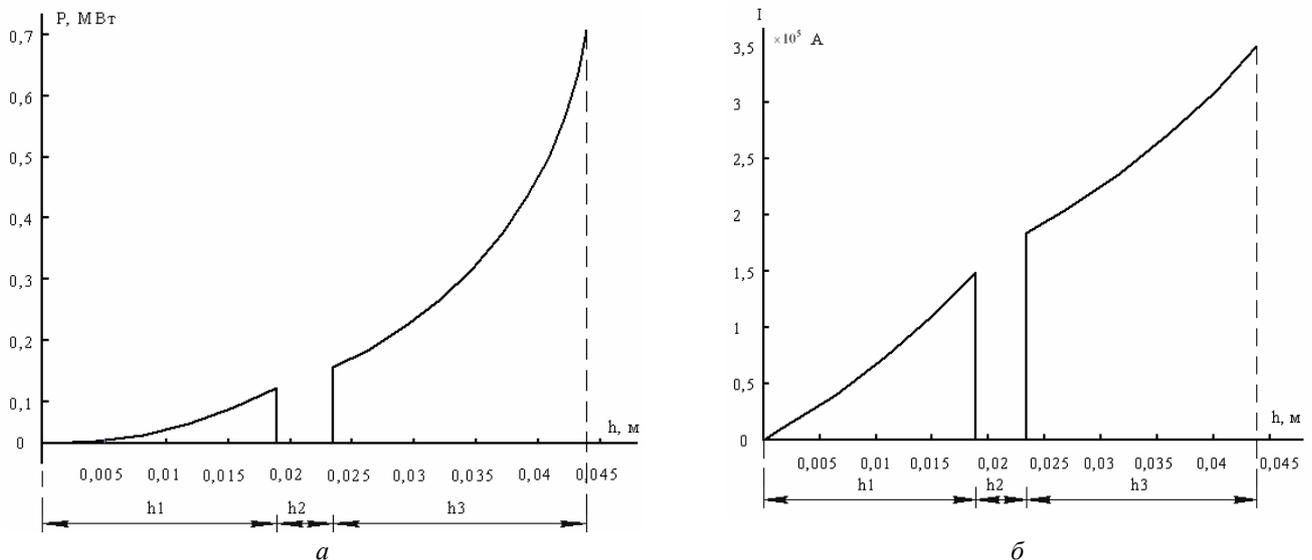
$$\frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{W(r, \delta, t)}{c\gamma}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial t} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial x^2} \right]; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial t} = a_3 \left[\frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{W(r, \delta, t)}{c\gamma}. \quad (8)$$



Р и с. 2. *a* - сетка конечно-элементной модели для расчета электромагнитных полей;
б - распределение плотности тока по длине:
 1 - на внутренней поверхности цилиндра пластикации, 2 - на поверхности шнека



Р и с. 3. *a* - распределение мощности внутренних источников тепла по сечению;
б - распределение плотности тока по сечению

Здесь $T_1(r, x, t)$ - температура стенки цилиндра пластикации, $T_2(r, x, t)$ - температура полимера; $T_3(r, x, t)$ - температура шнека; r и x - радиальная и аксиальная координаты, t - время процесса; γ - плотность материала цилиндра и шнека; c - удельная теплоемкость цилиндра и шнека; $W(r, \delta, t)$ - функция распределения внутренних источников тепла, полученных в результате решения электромагнитной задачи; \hat{a}_1 - коэффициент температуропроводности цилиндра пластикации; \hat{a}_2 - коэффициент температуропроводности полимера; \hat{a}_3 - коэффициент температуропроводности шнека.

Граничные и начальные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_1 [T_1(r, 0, t) - T_C(r, 0, t)]; \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} &= \alpha_1 [T_1(r_1, x, t) - T_C(r_1, x, t)]; & \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0; \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X} &= \alpha_2 [T_1(r, X, t) - T_C(r, X, t)]; & T_1(r, X, 0) &= T_{10}; \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_3 [T_3(r, 0, t) - T_{\bar{N}}(r, 0, t)]; & T_2[r, x, t]_{x=0} &= T_{20}(r, t); \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X} &= \alpha_4 [T_3(r, X, t) - T_{\bar{N}}(r, X, t)]; & T_2(r, X, 0) &= T_{20}(r, X); \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_2} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_2}; & T_1(R_2, x, t) &= T_2(R_2, x, t); \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_3} &= \lambda_2 \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_3}; & T_2(R_3, x, t) &= T_3(R_3, x, t).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь λ_1 - коэффициент теплопроводности цилиндра пластикации, λ_2 - коэффициент теплопроводности полимера, λ_3 - коэффициент теплопроводности шнека, α - коэффициент теплообмена.

Решение тепловой задачи выполним, используя первый закон термодинамики, записанный в виде дифференциальных уравнений для объемных тел:

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L)T \right] + (L)^T (q) = \ddot{q}, \tag{10}$$

здесь \ddot{q} - скорость образования тепла в конечном объеме, (q) - вектор теплового потока;

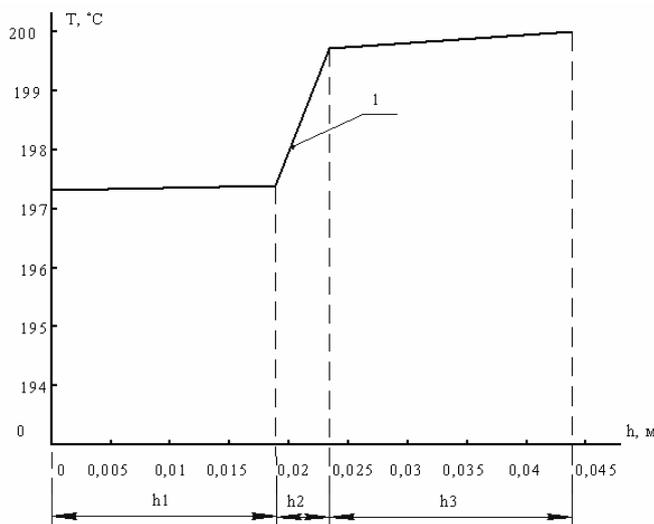
$(L)^T$ - векторный оператор, (v) - вектор, характеризующий скорость переноса тепла.

Связь между вектором теплового потока и температурным градиентом устанавливается по закону Фурье [3]:

$$(q) = -[D](L)T. \tag{11}$$

Объединение двух последних уравнений дает уравнение вида

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L)T \right] + (L)^T ([D](L)T) = \ddot{q}. \tag{12}$$



Р и с. 4. Температурное распределение по сечению полимерного материала

Полученные уравнения применяются в декартовой системе координат в линейной постановке.

Для полной физической определенности общая система уравнений дополняется эмпирическими зависимостями удельной теплоемкости, вязкости, коэффициентов теплопроводности, теплопередачи и других величин от температуры. Расчет теплового поля системы осуществляется с помощью метода конечных элементов. Аналитическое решение можно получить, но при условии значительных упрощений и низкой точности. Поэтому при использовании метода конечных элементов можно учесть непостоянство параметров внутри элементов рассматриваемой системы. В качестве инструментального средства для моделирования тепловых полей в сложной системе сопряженных тел выбран пакет моделирования полей различной природы FEMLAB, являющийся расширением популярной среды инженерных расчетов MATLAB. Пакет FEMLAB содержит средства для численного моделирования нестационарных физических полей, описываемых уравнениями в частных производных второго порядка.

В результате расчета получено температурное распределение в полимерном материале по его сечению при индукционном нагреве, которое представлено на рис. 4.

Анализ приведенных графических результатов показывает, что перепад температуры при индукционном нагреве по сечению полимерного материала приблизительно составляет 3 °С, что является допустимым по технологии изготовления изделий из пластмассы.

В заключение можно сказать, что выбор оптимального варианта индуктора представляет собой сложную многопараметрическую задачу, которая требует самостоятельного исследования на основе полученных в работе результатов. При разработке технологии производства изделий из пластмассы методом литья с использованием индукционного нагрева особое внимание следует обратить на выбор рабочей частоты источника питания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967. 415 с.
2. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
4. Завгородний В.К. Механизация и автоматизация переработки пластических масс. М.: Машиностроение, 1970. 595 с.

Статья поступила в редакцию 19 января 2007 г.

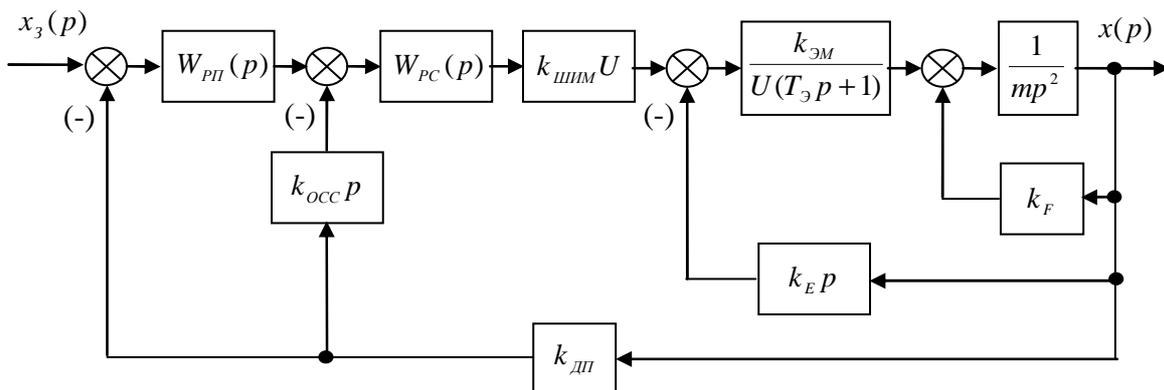
УДК 621-52

Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, И.С. Ткаченко

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРА

Рассмотрены вопросы устойчивости системы управления электромагнитным подвесом ротора, построенной по принципам подчиненного регулирования координат. Получены аналитические выражения границы устойчивости с учетом положительной обратной связи по перемещению, действующей в электромагнитном подшипнике. Предложен метод определения величины малой постоянной времени апериодического фильтра, обеспечивающей устойчивость и высокое быстродействие системы.

Структурная схема (рис. 1) одного канала системы управления электромагнитным подвесом ротора, построенной по принципам подчиненного регулирования координат, содержит два контура: внутренний – контур скорости и внешний – контур положения [1, 2].

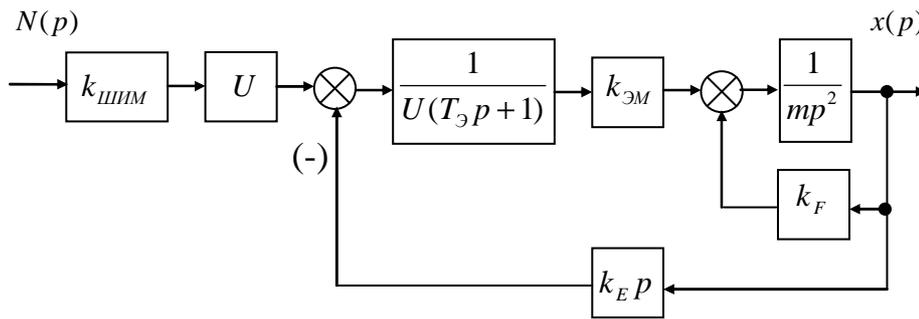


Р и с. 1. Структурная схема одного канала системы подчиненного регулирования электромагнитного подвеса ротора

На структурной схеме приняты следующие обозначения: $k_{шим}$ – коэффициент передачи широтно-импульсного модулятора; U – опорное напряжение широтно-импульсной модуляции; $T_э = \frac{L}{R}$ – электромагнитная постоянная времени обмоток электромагнитов; L – индуктивность, R – активное сопротивление обмоток электромагнитов; $k_{эм}$ – коэффициент передачи, связывающий приращение силы притяжения

магнитов с изменением соотношения токов в их обмотках; m – масса ротора, приходящаяся на один радиальный электромагнитный подшипник; k_F – коэффициент положительной обратной связи, учитывающий изменение силы притяжения электромагнитов при смещении ротора от центрального положения; k_E – коэффициент, связывающий наводимую в обмотках электромагнитов э.д.с. со скоростью перемещения ротора в магнитном поле; $W_{PC}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости; $W_{PI}(p)$ – передаточная функция регулятора положения; x_3 – заданное положение ротора (как правило – нулевое); x – перемещение ротора в поле электромагнитов (от центрального положения). В качестве датчика главной обратной связи используется бесконтактный датчик с коэффициентом передачи $k_{ДП}$, измеряющий положение ротора в поле электромагнитов. Для выделения сигнала обратной связи по скорости перемещения сигнал датчика положения ротора дифференцируется и вводится в систему с коэффициентом передачи $k_{ОСС}$.

Отличительная особенность электромагнитного подшипника (например, радиального) как объекта управления (рис. 2) заключается в наличии положительной обратной связи по перемещению.



Р и с. 2. Упрощенная структурная схема одной оси радиального электромагнитного подшипника

Передаточная функция рассматриваемого объекта управления по отношению к входному воздействию $N(p)$ на входе силового преобразователя

$$W_{Oy}^+(p) = \frac{\Delta x(p)}{\Delta N(p)} \frac{k_{ШИМ} k_{ЭМ}}{k_F \left[\frac{m T_{\text{э}}}{k_F} p^3 + \frac{m}{k_F} p^2 + \left(\frac{k_{ЭМ} k_E}{k_F U} - T_{\text{э}} \right) p - 1 \right]}. \quad (1)$$

В соответствии с общей методикой синтеза регуляторов систем подчиненного регулирования [1] пренебрегают положительной обратной связью по перемещению с коэффициентом передачи k_F , оценивая впоследствии ее влияние на статические и динамические свойства проектируемой системы. При этом передаточная функция объекта управления значительно упрощается и принимает вид интегроколебательного звена

$$W_{Oy}(p) = \frac{k_{ШИМ} U}{k_E \left[\frac{m U}{k_E k_{ЭМ}} T_{\text{э}} p^2 + \frac{m U}{k_E k_{ЭМ}} p + 1 \right] p}. \quad (2)$$

При настройке системы на технический оптимум оказывается, что в контуре скорости необходим пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор с аperiодическим фильтром на выходе (или входе)

$$W_{PC}(p) = \frac{\left(\frac{m U}{k_E k_{ЭМ}} T_{\text{э}} p^2 + \frac{m U}{k_E k_{ЭМ}} p + 1 \right)}{2 k_1 T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}, \quad (3)$$

где T_{μ} – постоянная времени аperiодического фильтра (малая постоянная времени),

$$k_1 = \frac{U k_{ШИМ} k_{ДП} k_{ОСС}}{k_E}.$$

В контуре положения требуется применить пропорциональный регулятор

$$W_{PI}(p) = k_{PI} = \frac{k_{OCC}}{4T_\mu}. \quad (4)$$

Постоянную времени T_μ апериодического фильтра можно выбирать произвольно исходя из требуемого быстродействия системы.

Передаточная функция одного канала замкнутой системы управления электромагнитного подвеса ротора (без учета положительной обратной связи по перемещению) по отношению к управляющему воздействию $x_3(p)$

$$W_{ЗАМ2}(p) = \frac{x(p)}{x_3(p)} = \frac{1}{k_{ДП}(8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p + 1)}. \quad (5)$$

Замкнутая система с передаточной функцией (5) всегда устойчива, а ее быстродействие при обработке управляющего воздействия определяется полностью величиной малой постоянной времени T_μ .

Однако передаточные функции (3) и (4) регуляторов и передаточная функция (5) замкнутой системы получены без учета положительной обратной связи по перемещению в предположении, что объект управления описывается передаточной функцией (2). Фактически, с учетом выражения (1), при выбранных типах и параметрах регуляторов передаточная функция замкнутой системы управления электромагнитным подвесом ротора по отношению к управляющему воздействию $x_3(p)$

$$W_{ЗАМ2}^+(p) = \frac{\frac{mU}{k_E k_{ЭМ}} T_\Delta p^2 + \frac{mU}{k_E k_{ЭМ}} p + 1}{k_{ДП} \left\{ \frac{8mUT_\Delta T_\mu^3}{k_E k_{ЭМ}} p^5 + \frac{8mUT_\mu^2 (T_\Delta + T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}} p^4 + \left[8T_\mu^3 + \frac{4mUT_\mu (T_\Delta + 2T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}} - \frac{8Uk_F T_\Delta T_\mu^3}{k_E k_{ЭМ}} \right] p^3 + \right.} \quad (6)$$

$$\left. + \left[8T_\mu^2 + \frac{mU (T_\Delta + 4T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}} - \frac{2Uk_F T_\mu^2 (T_\Delta + T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}} \right] p^2 + \left(4T_\mu + \frac{mU}{k_E k_{ЭМ}} - \frac{8Uk_F T_\mu^2}{k_E k_{ЭМ}} \right) p + 1 \right\}$$

При этом особый интерес представляет определение границы устойчивости системы управления электромагнитным подвесом ротора с учетом положительной обратной связи по перемещению. Действительно, при выбранных структуре и параметрах регуляторов без учета положительной обратной связи система управления электромагнитным подвесом ротора устойчива при любых значениях произвольной малой постоянной времени T_μ апериодического фильтра. Очевидно, что положительная обратная связь по перемещению окажет влияние на устойчивость и, соответственно, на граничные значения постоянной времени T_μ .

Применим алгебраический критерий Раussa-Гурвица [3] для определения границы устойчивости системы управления электромагнитным подвесом ротора с учетом положительной обратной связи по перемещению. Передаточная функция (6) имеет характеристическое уравнение пятого порядка

$$a_{00}p^5 + a_{11}p^4 + a_{22}p^3 + a_{33}p^2 + a_{44}p + a_{55} = 0,$$

$$\text{где } a_{00} = \frac{8mUT_\Delta T_\mu^3}{k_E k_{ЭМ}}; \quad a_{11} = \frac{8mUT_\mu^2 (T_\Delta + T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}}; \quad a_{22} = 8T_\mu^3 + \frac{4mUT_\mu (T_\Delta + 2T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}} - \frac{8Uk_F T_\Delta T_\mu^3}{k_E k_{ЭМ}};$$

$$a_{33} = 8T_\mu^2 + \frac{mU (T_\Delta + 2T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}} - \frac{2Uk_F T_\mu^2 (T_\Delta + T_\mu)}{k_E k_{ЭМ}}; \quad a_{44} = 4T_\mu + \frac{mU}{k_E k_{ЭМ}} - \frac{8Uk_F T_\mu^2}{k_E k_{ЭМ}}; \quad a_{55} = 1.$$

На основании критерия Раussa-Гурвица для устойчивости рассматриваемой системы управления необходимо и достаточно выполнение следующей системы неравенств [2]:

$$\left. \begin{aligned} a_{00} > 0; \quad a_{11} > 0; \quad a_{22} > 0; \quad a_{33} > 0; \quad a_{44} > 0; \quad a_{55} > 0; \\ a_{11}a_{22} - a_{00}a_{33} > 0; \\ (a_{11}a_{22} - a_{00}a_{33})(a_{33}a_{44} - a_{22}a_{55}) - (a_{11}a_{44} - a_{00}a_{55})^2 > 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Первое, второе и шестое неравенства в системе (7) выполняются всегда при любых параметрах системы управления электромагнитным подвесом ротора. Третье, четвертое и пятое неравенства, отвечающие за положительность соответствующих коэффициентов характеристического уравнения, являются необходимыми, но не достаточными условиями устойчивости рассматриваемой системы управления. Наиболее

жесткие требования к изменению параметров предъявляют седьмое и восьмое неравенства. Подставим в них значения коэффициентов a_{00} , a_{11} , a_{22} , a_{33} , a_{44} и a_{55} , выраженные через параметры электромагнитного подвеса ротора

$$\left. \begin{aligned}
 & \left(8 - \frac{6Uk_F T_{\vartheta}}{k_E k_{\vartheta M}} \right) T_{\mu}^3 + \left(\frac{8mU}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{6Uk_F T_{\vartheta}^2}{k_E k_{\vartheta M}} \right) T_{\mu}^2 + \left(\frac{16mU T_{\vartheta}}{k_E k_{\vartheta M}} \right) T_{\mu} + \frac{3mU T_{\vartheta}^2}{k_E k_{\vartheta M}} > 0; \\
 & \left(\frac{128U^2 k_F^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{96U^3 k_F^3 T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^8 + \left(\frac{704U^2 k_F^2 T_{\vartheta}}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{192U^3 k_F^3 T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{768Uk_F}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{384mU^3 k_F^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^7 + \\
 & + \left(\frac{576U^2 k_F^2 T_{\vartheta}^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} + 192 - \frac{52mU^3 k_F^2 T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{96U^3 k_F^3 T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{528mU^2 k_F}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{144Uk_F T_{\vartheta}}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{512mU^3 k_F T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^6 + \\
 & + \left(\frac{192mU}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{72mU^3 k_F^2 T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{48mU^2 k_F T_{\vartheta}}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{144Uk_F T_{\vartheta}^2}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{144m^2 U^3 k_F}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^5 + \\
 & + \left(\frac{108mU^3 k_F^2 T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} + \frac{96m^2 U^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{120m^2 U^3 k_F T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^4 + \\
 & + \left(\frac{24m^2 U^2 T_{\vartheta}^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} + \frac{24m^3 U^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{84m^2 U^3 k_F T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^3 + \left(\frac{24m^3 U^3 T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{36m^2 U^3 k_F T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^2 + \\
 & + \left(\frac{20m^3 U^3 T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu} + \frac{3m^3 U^3 T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} > 0.
 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

Граничные значения постоянной времени T_{μ} (соответствующие границе устойчивости системы управления электромагнитным подвесом ротора) находятся из решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned}
 & \left(8 - \frac{6Uk_F T_{\vartheta}}{k_E k_{\vartheta M}} \right) T_{\mu}^3 + \left(\frac{8mU}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{6Uk_F T_{\vartheta}^2}{k_E k_{\vartheta M}} \right) T_{\mu}^2 + \left(\frac{16mU T_{\vartheta}}{k_E k_{\vartheta M}} \right) T_{\mu} + \frac{3mU T_{\vartheta}^2}{k_E k_{\vartheta M}} = 0; \\
 & \left(\frac{128U^2 k_F^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{96U^3 k_F^3 T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^8 + \left(\frac{704U^2 k_F^2 T_{\vartheta}}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{192U^3 k_F^3 T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{768Uk_F}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{384mU^3 k_F^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^7 + \\
 & + \left(\frac{576U^2 k_F^2 T_{\vartheta}^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} + 192 - \frac{52mU^3 k_F^2 T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{96U^3 k_F^3 T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{528mU^2 k_F}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{144Uk_F T_{\vartheta}}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{512mU^3 k_F T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^6 + \\
 & + \left(\frac{192mU}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{72mU^3 k_F^2 T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{48mU^2 k_F T_{\vartheta}}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{144Uk_F T_{\vartheta}^2}{k_E k_{\vartheta M}} - \frac{144m^2 U^3 k_F}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^5 + \\
 & + \left(\frac{108mU^3 k_F^2 T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} + \frac{96m^2 U^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} - \frac{120m^2 U^3 k_F T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^4 + \\
 & + \left(\frac{24m^2 U^2 T_{\vartheta}^2}{k_E^2 k_{\vartheta M}^2} + \frac{24m^3 U^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{84m^2 U^3 k_F T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^3 + \left(\frac{24m^3 U^3 T_{\vartheta}}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} - \frac{36m^2 U^3 k_F T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu}^2 + \\
 & + \left(\frac{20m^3 U^3 T_{\vartheta}^2}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} \right) T_{\mu} + \frac{3m^3 U^3 T_{\vartheta}^3}{k_E^3 k_{\vartheta M}^3} = 0.
 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

Первое уравнение в системе (9) является алгебраическим уравнением третьего порядка относительно переменной T_μ , и его корни могут быть найдены аналитически (решение Кардано) [3]. Второе уравнение в (9) имеет восьмой порядок относительно T_μ и поэтому может быть решено только численными методами (алгебраические уравнения выше четвертого порядка общего решения не имеют). Воспользуемся пакетом прикладных программ «MathCAD» для решения системы уравнений (9). Матрица коэффициентов уравнения восьмого порядка

$$v := \begin{pmatrix} A8 \\ A7 \\ A6 \\ A5 \\ A4 \\ A3 \\ A2 \\ A1 \\ A0 \end{pmatrix},$$

где коэффициенты $A0 = \frac{128U^2k_F^2}{k_E^2k_{ЭМ}^2} - \frac{96U^3k_FT_{Э}}{k_E^3k_{ЭМ}^3};$

$$A1 = \frac{704U^2k_FT_{Э}}{k_E^2k_{ЭМ}^2} - \frac{192U^3k_FT_{Э}^2}{k_E^3k_{ЭМ}^3} - \frac{768Uk_F}{k_Ek_{ЭМ}} - \frac{384mU^3k_F^2}{k_E^3k_{ЭМ}^3};$$

$$A2 = \frac{576U^2k_FT_{Э}^2}{k_E^2k_{ЭМ}^2} + 192 - \frac{52mU^3k_FT_{Э}}{k_E^3k_{ЭМ}^3} - \frac{96U^3k_FT_{Э}^3}{k_E^3k_{ЭМ}^3} - \frac{528mU^2k_F}{k_E^2k_{ЭМ}^2} - \frac{144Uk_FT_{Э}}{k_Ek_{ЭМ}} - \frac{512mU^3k_FT_{Э}}{k_E^3k_{ЭМ}^3};$$

$$A3 = \frac{192mU}{k_Ek_{ЭМ}} - \frac{72mU^3k_FT_{Э}^2}{k_E^3k_{ЭМ}^3} - \frac{48mU^2k_FT_{Э}}{k_E^2k_{ЭМ}^2} - \frac{144Uk_FT_{Э}^2}{k_Ek_{ЭМ}} - \frac{144m^2U^3k_F}{k_E^3k_{ЭМ}^3};$$

$$A4 = \frac{108mU^3k_FT_{Э}^3}{k_E^3k_{ЭМ}^3} + \frac{96m^2U^2}{k_E^2k_{ЭМ}^2} - \frac{120m^2U^3k_FT_{Э}}{k_E^3k_{ЭМ}^3};$$

$$A5 = \frac{24m^2U^2T_{Э}^2}{k_E^2k_{ЭМ}^2} + \frac{24m^3U^3}{k_E^3k_{ЭМ}^3} - \frac{84m^2U^3k_FT_{Э}^2}{k_E^3k_{ЭМ}^3}; \quad A6 = \frac{24m^3U^3T_{Э}}{k_E^3k_{ЭМ}^3} - \frac{36m^2U^3k_FT_{Э}^3}{k_E^3k_{ЭМ}^3};$$

$$A7 = \frac{20m^3U^3T_{Э}^2}{k_E^3k_{ЭМ}^3}; \quad A8 = \frac{3m^3U^3T_{Э}^3}{k_E^3k_{ЭМ}^3}.$$

Корни второго уравнения в (9) при параметрах системы управления радиального электромагнитного подшипника: $k_E = 1461$ Вc/м; $k_{ЭМ} = 1306$ Н; $k_F = 1315900$ Н/м; $m = 18$ кг; $R = 117,7$ Ом; $L = 4,5$ Гн; $T_{Э} = 0,038233$ с; $U = 57,7$ В; $k_{ШИМ} = 0,001961$; $k_{ОСС} = 1$ с⁻¹; $k_{ДШ} = 1000000$ дискрет/м; $T_\mu = 0,0001$ с, $k_F = 1315900$ Н/м, – имеют следующие значения:

$$\text{polyroots}(v) = \begin{pmatrix} -0.112 \\ -9.868 \times 10^{-4} + 3.879i \times 10^{-4} \\ -9.868 \times 10^{-4} - 3.879i \times 10^{-4} \\ 7.498 \times 10^{-4} - 1.521i \times 10^{-3} \\ 7.498 \times 10^{-4} + 1.521i \times 10^{-3} \\ 1.067 \times 10^{-3} \\ 7.814 \times 10^{-3} \\ 0.312 \end{pmatrix} .$$

С учетом того, что значения T_μ могут быть только действительными и положительными, из решения алгебраического уравнения восьмого порядка нас интересуют следующие величины малой постоянной времени: $T_{\mu 1} = 1,067 \times 10^{-3}$ с, $T_{\mu 2} = 7,814 \times 10^{-3}$ с и $T_{\mu 3} = 0,312$ с. Анализ второго неравенства в системе (8) показывает, что на интервале между значениями от 0 до $T_{\mu 1}$ и от $T_{\mu 2}$ до $T_{\mu 3}$ оно выполняется, а между корнями $T_{\mu 1}$ и $T_{\mu 2}$ не выполняется. Следовательно, дополнительного исследования требуют два интервала значений постоянной времени T_μ . Для этого найдем корни первого уравнения из системы (9). Матрица его коэффициентов

$$v1 := \begin{pmatrix} A33 \\ A22 \\ A11 \\ A00 \end{pmatrix},$$

$$\text{где } A00 = 8 - \frac{6Uk_F T_\Delta}{k_E k_{\Delta M}}; \quad A11 = \frac{8mU}{k_E k_{\Delta M}} - \frac{6Uk_F T_\Delta^2}{k_E k_{\Delta M}}; \quad A22 = \frac{16mU T_\Delta}{k_E k_{\Delta M}}; \quad A33 = \frac{3mU T_\Delta^2}{k_E k_{\Delta M}}.$$

Корни рассматриваемого алгебраического уравнения третьей степени

$$\text{polyroots}(v1) = \begin{pmatrix} -0.306 \\ -2.199 \times 10^{-3} \\ 3.14 \times 10^{-3} \end{pmatrix} .$$

Отбрасываем отрицательные значения корней, которые не подходят для решения поставленной задачи по физическому смыслу. Анализ показывает, что выполнение первого неравенства в (8) наблюдается при значениях T_μ от 0 до $3,14 \times 10^{-3}$ с. Сравнивая аналогичные результаты при решении второго неравенства в (8), приходим к выводу, что границей устойчивости для рассматриваемой системы управления электромагнитным подвесом ротора является значение $T_\mu = 1,067 \times 10^{-3}$ с, причем диапазон возможных изменений малой постоянной времени находится в пределах от 0 до $1,067 \times 10^{-3}$ с.

Предлагаемый подход к анализу устойчивости и выбору малой постоянной времени апериодического фильтра справедлив для любого электромагнитного подвеса ротора, использующего подобную систему подчиненного управления электромагнитами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рапопорт Э. Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Куйбышев: КПТИ, 1985.
2. *Бесекинский В. А., Попов Е. В.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984.

Статья поступила в редакцию 29 января 2007 г.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ НЕФТЕПРОВОДА

Предлагается методика разработки математической модели энергопотребления и метод оптимизации режима работы нефтепровода, что позволит повысить энергоэффективность транспорта нефти по магистральным нефтепроводам.

Постановка цели

Наверное, нет ни одной крупной нефтедобывающей страны, где доля транспортной составляющей в себестоимости продукции играла бы такую большую роль, как в России.

Возросшее экологическое сознание и ограниченность энергосодержащих природных ресурсов создают необходимость более экономичного расхода энергоносителей. Шестая часть затрат транспорта нефти – это затраты на электроэнергию [1].

В последнее время в соответствии с Федеральным законом "Об энергосбережении" №28-ФЗ, а также с Приказом Департамента государственного энергетического надзора и энергосбережения Минэнерго РФ от 16 февраля 2001 г. №10 «О проведении обязательных энергетических обследований на предприятиях и организациях», в России уделяется большое внимание проблемам энергосбережения. В настоящее время ввиду жесткой тарифной политики энергопроизводителей на многих предприятиях проводятся работы по выявлению нерационального использования электрической энергии и разработке мероприятий по её минимизации.

Цель работы: повышение энергоэффективности транспорта нефти по магистральным нефтепроводам и оптимизация режима работы нефтепровода.

В настоящее время расчёт за электроэнергию производится по двухставочному тарифу, причём предприятие должно заранее заявлять свои потребности в электроэнергии. За перерасход или за недопотребление предприятие должно платить штраф. Вследствие этого становится необходимым точное прогнозирование энергопотребления. Этой проблеме и посвящена данная работа.

В настоящее время расчёт энергопотребления производится по методике, разработанной в 70-е годы, которая ориентирована на загрузку нефтепровода 90-95% [1], и поэтому сейчас существующая методика даёт ошибку до 15%. Наиболее энергоёмкими электроприёмниками являются электродвигатели подпорных и магистральных насосных агрегатов. Мощность электроприводов магистральных насосных агрегатов достигает 8000 кВт, подпорных – 2000 кВт.

Для расчета электрической мощности магистральных и подпорных насосных агрегатов (в упрощенной форме) необходимо знать:

- КПД насоса (для каждого режима);
- КПД электродвигателя (для каждого режима);
- подачу насосов (грузооборот);
- давление на входе и выходе насоса;
- плотность нефти (для каждого режима);
- протяженность трубопровода.

По данным [2] и [3], кроме плановых диспетчерских воздействий на работу магистрального нефтепровода (далее по тексту – МНП) при заданном режиме, снижение пропускной способности всего эксплуатационного участка может произойти из-за влияния следующих факторов:

- переменная загрузка нефтепровода, обусловленная графиком поставок нефти (промыслов), нефтепроводов и нефтеперерабатывающих заводов;
- изменение реологических характеристик перекачиваемых жидкостей, вызванное сезонными и местными изменениями температуры грунта, последовательной перекачкой партий разных нефтей с различным содержанием воды, парафинов, растворенного газа и т.д.;
- технологические факторы - изменение параметров насосов, их включение и выключение, наличие запасов нефти или свободных емкостей, изменение объема приемо-сдаточных операций, нестационарные процессы и т.д.;
- аварийные и ремонтные ситуации, вызванные авариями на линейной части нефтепровода или отказами оборудования. Некоторые из этих факторов действуют систематически, некоторые - периодически. Все это создает условия, при которых режимы работы системы «питающая электрическая сеть - электродвигатель - насос - нефтепровод» непрерывно меняются во времени.

Колебания пропускной способности нефтепровода неизбежны, так как невозможно устранить воздействие всех изложенных факторов. Это затрудняет эксплуатацию нефтепроводов, приводит к повышенным затратам электроэнергии, что соответственно приводит к увеличению себестоимости перекачки, снижает надежность работы нефтепроводов. Особенно негативно сказывается неравномерность перекачки на КПД насосов и электродвигателей и расходе электроэнергии. Снижение затрат энергии на перекачку, обеспечивающее улучшение технико-экономических показателей нефтепроводов, вызывает необходимость постоянного мониторинга режима работы всей системы «питающая электрическая сеть - электродвигатель - насос - нефтепровод» на всех цепочках преобразования энергии эксплуатационного участка МНП – от электрической до гидравлической. Контроль за осложнениями - потери мощности (электроэнергии) на различных участках системы: в электрической сети, на основном оборудовании, на линейной части МНП, так же как и слежение за технологическими параметрами (напор, производительность, давление и т.д.) в настоящее время становится все более актуальным [4]. Таким образом, для наиболее точного расчёта энергопотребления актуально разработать математическую модель.

В данной работе предлагается методика расчёта с помощью математической модели энергопотребления, созданной на основе статистических данных, наработанных за многие годы, и оптимизация режима работы нефтепровода.

Анализ энергопотребления на перекачку нефти по магистральному нефтепроводу

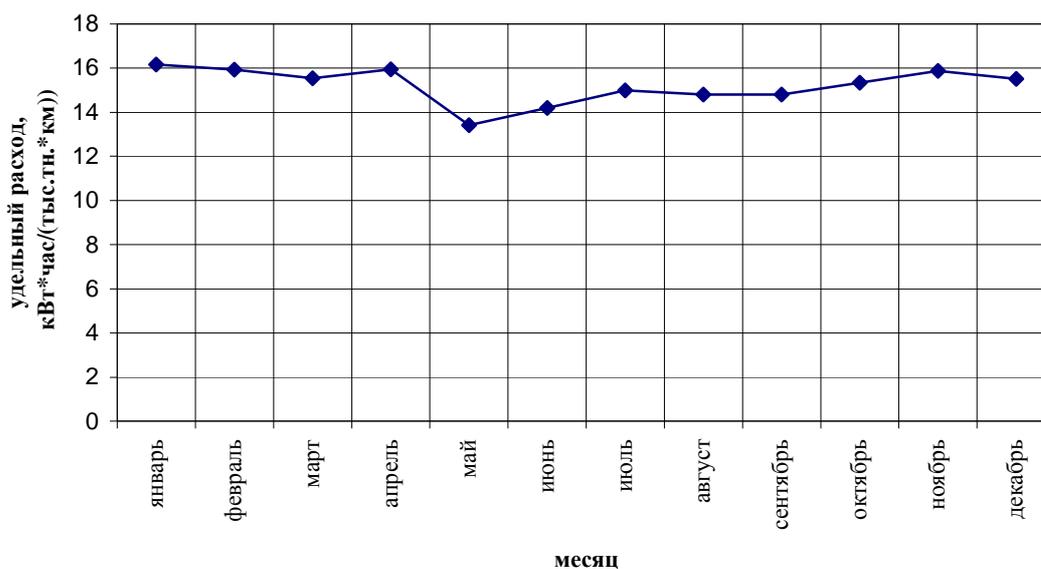
Для анализа был выбран МНП «Гурьев – Куйбышев», данные удельного расхода электроэнергии на транспорт нефти за 2005 год находятся в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Удельный расход электроэнергии на транспорт нефти за 2005 г.

Месяц	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Удельный расход, кВт·час/тыс.тн.км	16,17	15,93	15,54	15,95	13,42	14,2	15	14,81	14,81	15,34	15,88	15,52

Из диаграммы (рис. 1) удельного энергопотребления видно, что удельное энергопотребление нефтеперекачивающей станции (далее по тексту – НПС) отличается по месяцам. Из этого можно сделать вывод, что существуют факторы, влияющие на расход электроэнергии. Попробуем выделить эти факторы.



Р и с. 1. Диаграмма удельного энергопотребления

- 1) Q – количество перекачиваемой нефти, тонн;
- 2) $\Delta P = P_{вых} - P_{вх}$ – перепад давления создаваемый центробежным насосом;

- 3) ρ - плотность нефти, кг/м³;
- 4) ν – вязкость нефти сСт;
- 5) переменная нагрузка нефтепровода, частые смены режима перекачки;
- 6) работа основного оборудования в области неоптимальных КПД;
- 7) рассеивание механической энергии и переход её сначала в энергию вихрей, а затем в тепловую энергию.

В расчётах энергопотребления трудно учесть все вышеперечисленные факторы, особенно последние три.

Выбор модели энергопотребления

Под моделью понимается вид функции отклика [5]

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (1)$$

Выбрать модель – значит выбрать вид этой функции, записать её уравнение.

Из анализа удельного энергопотребления следует, что для расчёта расхода электроэнергии целесообразно выбрать полином второй или третьей степени. Для упрощения расчётов взят полином второй степени.

Математическая модель энергопотребления по данным [5]

$$\mathcal{E} = k_1 \Delta P + k_2 Q + k_{12} Q \Delta P + k_{11} \Delta P^2 + k_{22} Q^2. \quad (2)$$

Весовые коэффициенты в этой модели вычислены методом наименьших квадратов матричным способом. Для примера была выбрана ЛПДС «Б. Черниговка».

$$K = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y, \quad (3)$$

где X – исходная система линейных уравнений; Y – матрица-столбец потребления электроэнергии за месяц (тыс. кВт*час), для расчёта были взяты 8 месяцев.

После преобразований имеем

$$k = \begin{pmatrix} 15,983 \\ 2,119 \\ -9,3 * 10^{-4} \\ -0,392 \\ 4,16 * 10^{-4} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

т.е. $k_1 = 15,983$; $k_2 = 2,119$; $k_{12} = -9,3 * 10^{-4}$; $k_{11} = -0,392$; $k_{22} = 4,16 * 10^{-4}$. Таким образом, можем записать:

$$\mathcal{E} = 15,983 \Delta P + 2,119 Q - 9,3 * 10^{-4} \Delta P Q - 0,392 \Delta P^2 + 4,16 * 10^{-4} Q^2. \quad (5)$$

Оценка адекватности математической модели

Проверка точности модели производилась по данным 2005 года той же НПС (НПС «Б. Черниговка»). Данные, необходимые для расчета, находятся в табл. 2 (E – опытные значения, \mathcal{E} – расчетные значения), опытная и расчетная диаграммы энергопотребления приведены на рис. 2.

Т а б л и ц а 2

Расчет остаточной суммы квадратов

Месяц	E	\mathcal{E}	$\Delta \mathcal{E} = E - \mathcal{E}$	$\Delta \mathcal{E}^2$
1	1427	1389	38	1444
2	410	425	-15	225
3	1152	1117	35	1225
4	2251	2237	14	196
5	525	511	14	196
6	1463	1507	-44	1936
7	1366	1399	-33	1089
8	1556	1547	9	81
9	1530	1500	30	900
10	1380	1367	13	169
11	1147	1145	2	4
12	1242	1274	-32	1024

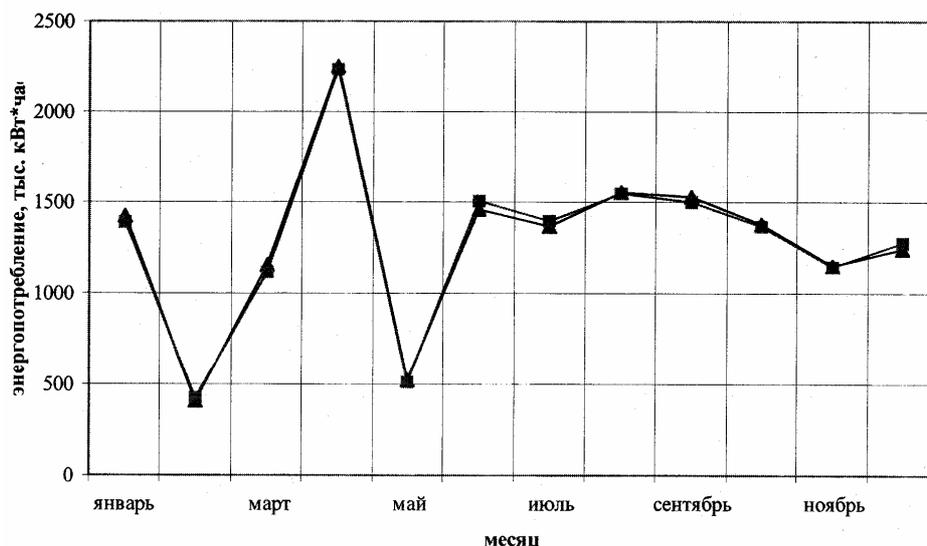
Средняя погрешность полученной модели определяется по формуле

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta \mathcal{E}}{N * E_{cp}} * 100\% . \quad (6)$$

$\delta = 0,201 \%$. Кроме того, данную математическую модель можно оценить с помощью среднеквадратичной погрешности:

$$\xi = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \mathcal{E}^2}}{N * E_{cp}} * 100\% . \quad (7)$$

$\xi = 0,6 \%$. Таким образом, разработанная математическая модель дает хорошее совпадение расчетных характеристик с опытными.



Р и с. 2. Опытная и расчетная диаграммы энергопотребления

Получить более совершенную модель можно за счет сбора дополнительной информации:

- снятия показаний счётчиков непосредственно с «двигательных» ячеек;
- уменьшения временных интервалов (сутки, 2 часа);
- учета в математической модели вязкости и плотности нефти;
- увеличения степени полинома.

Всё это позволит довести погрешность модели до 1% и менее.

Применение математической модели энергопотребления

Разработанная математическая модель может использоваться в следующих случаях:

- при проектировании и капитальном ремонте НПС для подбора электрооборудования с учётом дальнейшей стратегии Компании;
- при настройке релейных защит и автоматики;
- при прогнозировании потребления электроэнергии.

Последний пункт имеет наиболее важное значение.

Оптимизация режима работы нефтепровода

Для планирования плановых остановок, снижений нагрузки (работа станции при нагрузке менее 50%, в этом режиме могут проводиться плановые работы как на основном механо-энергетическом оборудовании, так и на линейной части), а также для работы в более экономичном режиме требуется оптимизация процесса работы нефтепровода. В табл. 3 представлена карта технологических режимов НПС «Б. Черниговка».

Для оптимизации режима работы нефтепровода выделим следующие параметры:

- p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 – мощность 1, 2, 3, 4, 5 режима соответственно, кВт;
- q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 – расход 1, 2, 3, 4, 5 режима соответственно, тыс. т/сутки;
- t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 – время работы 1, 2, 3, 4, 5 режима соответственно, сутки.

Карта технологических режимов

Номер режима	Расход, м ³ /час	Производительность, тыс.т	Расход, тыс.т/сутки	P _{вх}	P _{вых}	Мощность, кВт
1	2480	4,216	50,6	0,5	42	4814
2	2039	3,467	41,6	0,5	44	4149
3	1824	3,1	37,2	0,5	38	3198
4	1412	2,4	28,8	0,5	32	2080
5	1076	1,83	22	0,5	22	1083

Составим уравнения, необходимые для оптимизации режима работы нефтепровода:

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = T ; \quad (8)$$

$$q_1 t_1 + q_2 t_2 + q_3 t_3 + q_4 t_4 + q_5 t_5 = Q ; \quad (9)$$

$$p_1 t_1 + p_1 t_1 + p_1 t_1 + p_1 t_1 + p_1 t_1 = P \rightarrow \min , \quad (10)$$

где T – отчетный период времени работы нефтепровода в сутках (обычно месяц за минусом плановой остановки); Q – требуемый объем перекачки за отчетный период времени, тыс.т; P – расчетный расход электроэнергии.

Для обработки данных уравнений написана программа на языке «Делфи», которая методом подбора вычисляет такие t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 , при которых расчетный расход электроэнергии минимален, после чего, зная режим и время работы в этом режиме, нетрудно вычислить уточненное значение расхода электроэнергии с помощью математической модели энергопотребления.

Заключение

Разработана математическая модель энергопотребления при транспортировке нефти по магистральному нефтепроводу и способ оптимизации режима работы нефтепровода, что позволяет прогнозировать потребление электроэнергии с удовлетворительной точностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Голосовкер В.И.* Расчет расхода электроэнергии для участка нефтепровода // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1973. №5. С. 16–19.
2. *Зайцев Л.А., Ясинский Г.С.* Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 1980. 187 с.
3. *Васильев Г.Г., Коробков Г.Е., Коршак А.А., и др.* Трубопроводный транспорт нефти: Учебник для вузов: / Под ред. С.М. Вайнштока. В 2 т. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. Т.1. 407 с.
4. *Железко Ю.С.* Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.: ил.
5. *Адлер Ю.П. и др.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с.

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2006 г.

УДК 621.311 : 621.365.2. (075.8)

В.М. Салтыков, О.А. Салтыкова С.А. Марченко, В.А. Гудыма

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ

В разработанном методе расчета характеристик электротехнического комплекса "система электроснабжения - дуговая сталеплавильная печь" показана степень влияния потерь мощности в системе электроснабжения на точность определения характеристик дуговых сталеплавильных печей и показателей качества напряжения на шинах их питания. Показано, что учет коэффициента потерь мощности в системе электроснабжения с дуговыми сталеплавильными печами незначительно влияет на точность определения их характеристик, но приводит к большим погрешностям (от 9 до 72 %) при определении показателей качества (отклонений и колебаний) на шинах их питания.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП), являясь мощной электрической нагрузкой, оказывают существенное влияние на изменение параметров питающей системы электроснабжения (СЭС), в первую очередь в виде потерь мощности и, следовательно, потерь напряжения во всех элементах питающей сети. Одновре-

менно указанные изменения в СЭС приводят к изменению электрических и рабочих характеристик самих дуговых сталеплавильных печей и, таким образом, представляют собой электротехнический комплекс "система электроснабжения – дуговая сталеплавильная печь". Следовательно, целесообразным является комплексное решение проблемы определения электрических и рабочих характеристик ДСП с учетом изменяющихся параметров СЭС [1].

Как известно, СЭС до шин подключения дуговой сталеплавильной печи, как показано на рисунке, включает в себя, как правило, высоковольтные линии напряжением 110...220 кВ, силовые трансформаторы ГПП (главной понизительной подстанции), кабели связи ГПП с ДСП.

Питание мощных ДСП наиболее целесообразно осуществлять через отдельные двухобмоточные трансформаторы ГПП по схеме "глубокого ввода", что обеспечивает независимое питание дуговых сталеплавильных печей и других потребителей.

Потери напряжения в СЭС до шин питания печи в этом случае могут быть определены по выражению [2]

$$U_{C-ДСП} = U_C - \sqrt{\left[\sqrt{\left[\sqrt{(U_C - \Delta U'_L)^2 + (\Delta U''_L)^2} - \Delta U'_T \right]^2 + (\Delta U''_T)^2} - \Delta U'_K \right]^2 + (\Delta U''_K)^2}, \quad (1)$$

где $\Delta U'_L, \Delta U'_T, \Delta U'_K$ – продольные составляющие падения напряжения в питающей высоковольтной линии, силовом трансформаторе, кабеле связи ГПП с ДСП; $\Delta U''_L, \Delta U''_T, \Delta U''_K$ – поперечные составляющие падения напряжения в высоковольтной линии, силовом трансформаторе, кабеле.

Расчеты показывают, что при питании дуговых сталеплавильных печей емкостью 6...100 т можно пренебречь поперечными составляющими падения напряжения во всех элементах питающей СЭС, так как погрешность без учета этих составляющих равна 0,1...1,5%, причем меньшая погрешность характерна для ДСП меньшей мощности.

Таким образом, можно записать:

$$\Delta U_{C-ДСП} \approx \Delta U'_L + \Delta U'_T + \Delta U'_K. \quad (2)$$

В свою очередь, потери напряжения в системах питания ДСП в общем виде предлагается определять с использованием значений реактивной нагрузки ДСП Q и коэффициента b , отражающих изменения потерь мощности в СЭС при изменяемой нагрузке ДСП, по выражению

$$\Delta U_{C-ДСП} = \frac{b \cdot Q_{ДСП} \cdot X_C}{U_C}, \quad (3)$$

где b – коэффициент потерь мощности в СЭС, вызванных нагрузкой ДСП; U_C – напряжение на шинах энергосистемы, $U_C \approx U_{ВН} \approx U_{НН} \cdot K_T$; K_T – коэффициент трансформации силового трансформатора ГПП; $X_C = X_{СИСТ} + X_L + X_T + X_K$; $X_{СИСТ}, X_L, X_T, X_K' = K_T^2 \cdot X_K$ – реактивные сопротивления элементов питающей СЭС: энергосистемы, высоковольтной линии, силового трансформатора, кабеля связи.

В результате проведенных расчетов было установлено, что для практических расчетов при определении электрических и рабочих характеристик ДСП при питании ДСП от двухобмоточного

(ДОТ) силового трансформатора ГПП с напряжениями 110/35 кВ – $b_{ДОТ}(U_{ВН=110кВ})$ и с напряжениями 220/35 кВ – $b_{ДОТ}(U_{ВН=220кВ})$ целесообразно принимать значения коэффициента потерь мощности в СЭС b постоянными и, в частности, равными величинам

$$b_{ДОТ}(U_{ВН=110кВ}) = 1,2; \quad (4)$$

$$b_{ДОТ}(U_{ВН=220кВ}) = 1,1. \quad (5)$$

При определении электрических и рабочих характеристик ДСП при питании их через трансформаторы с расщепленными обмотками (ТРО) с напряжением обмотки ВН 110 или 220 кВ значение коэффициента потерь мощности в СЭС b можно принять постоянным и равным

$$b_{ТРО} = 1,2. \quad (6)$$

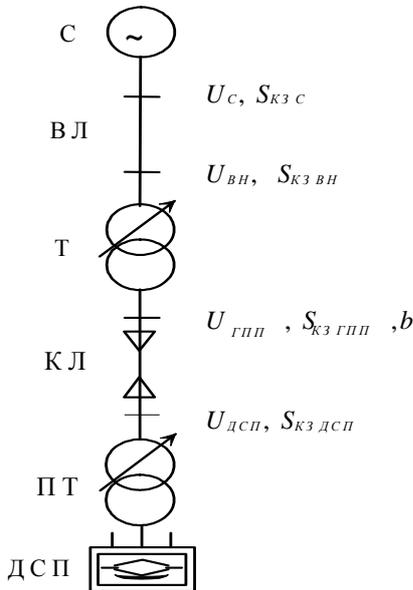


Схема электроснабжения электротехнического комплекса "система электроснабжения – дуговая сталеплавильная печь":

С – система; ВЛ – воздушная линия; КЛ – кабельная линия; ПТ – печной трансформатор; ДСП – дуговая сталеплавильная печь

Для практических расчетов при питании ДСП от трехобмоточного (ТОТ) трансформатора целесообразно использовать постоянное значение коэффициента потерь мощности в СЭС b , изменяющееся при протекании дополнительной общепромышленной нагрузки через элементы питающей СЭС и определяемое из следующих аналитических выражений:

для ДСП-40 (обмотка СН)

$$b_{ТОТ(U_{СН}=35кВ)} = 1,2 + A_1 \cdot K_3 ; \quad (7)$$

для ДСП-6 (обмотка НН)

$$b_{ТОТ(U_{НН}=6кВ)} = 1,4 + A_2 \cdot K_3 , \quad (8)$$

где K_3 – коэффициент загрузки соседней с нагрузкой ДСП обмотки трансформатора.

Коэффициенты A_i для соседних обмоток НН при питании ДСП-40 от обмотки СН через силовые трехобмоточные трансформаторы ГПП можно принять равными: при $S_{Т,ГПП} = 40$ МВА – $A_1 = 1,9$; при $S_{Т,ГПП} = 63$ МВА – $A_1 = 1,7$; при $S_{Т,ГПП} = 80$ МВА – $A_1 = 1,45$.

Коэффициенты A_i для соседних обмоток СН при питании ДСП-6 от обмотки НН через силовые трехобмоточные трансформаторы ГПП можно принять равными: при $S_{Т,ГПП} = 40$ МВА – $A_2 = 3,2$; при $S_{Т,ГПП} = 63$ и 80 МВА – $A_2 = 2,8$.

При заданном рабочем токе ДСП – $I_{ДСП.2}$ необходимость учета коэффициентов потерь мощности b в питающей ДСП СЭС, определяемых для разных видов трансформаторов ГПП по (4...8), проявляется, в первую очередь, при расчете полного сопротивления печного контура – $Z_{ДСП}$

$$Z_{ДСП} = \frac{U_{исх.ГПП} \cdot S_{кз.ГПП} - 3 \cdot b \cdot I_{ДСП.2}^2 \cdot X_{ДСП} \cdot U_{исх.ДСП}}{\sqrt{3} \cdot K_{ПТ} \cdot I_{ДСП.2} \cdot S_{кз.ГПП}} , \quad (9)$$

где $U_{исх.ГПП}$ – исходное напряжение на шинах питания ДСП от ГПП (до подключения ДСП); $S_{кз.ГПП}$ – мощность короткого замыкания (КЗ) на шинах питания ДСП от ГПП (в общем случае переменна и зависит от уровня напряжения $U_{исх.ГПП}$); $K_{ПТ}$ – коэффициент трансформации печного трансформатора; $I_{ДСП.2}$ – вторичный ток дуги ДСП; $X_{ДСП}$ – индуктивное сопротивление печного контура ДСП;

а затем при определении всех последующих электрических характеристик ДСП: активной, реактивной и полной мощностей ДСП – $P_{ДСП}$, $Q_{ДСП}$, $S_{ДСП}$; мощности дуги ДСП – $P_{дуги}$, рабочих характеристик ДСП: производительности печи – $G_{ДСП}$, удельного расхода электроэнергии – $W_{уд}$, а также показателей качества напряжения на шинах питания ДСП от ГПП: установившихся отклонений напряжения – $\delta U_{у,ГПП}$, колебаний напряжения – $\delta U_{т,ГПП}$.

Указанные характеристики ДСП и СЭС для ряда основных типов применяемых ДСП: ДСП-100НЗА; ДСП-40; ДСП-10; при коэффициентах $m_t = I_{ДСП.2} / I_{ДСП.ЭКЗ.2}$, соответствующих минимуму удельных расходов электроэнергии ДСП – $W_{уд,мин}$, приведены в таблице.

Погрешности при определении электрических и рабочих характеристик ДСП на максимальных ступенях печных трансформаторов без учета коэффициента потерь мощности b в СЭС

Электрические и рабочие характеристики ДСП	ДСП-100НЗА ($S_{ПТ} = 63$ МВА) ($U_{НН} = 35$ кВ) ($S_{Т,ГПП,ДОТ} = 160$ МВА)		ДСП-40 ($S_{ПТ} = 32$ МВА) ($U_{СН} = 35$ кВ) ($S_{Т,ГПП,ТОТ} = 40$ МВА)		ДСП-40 ($S_{ПТ} = 15$ МВА) ($U_{НН} = 10$ кВ) ($S_{Т,ГПП,ТРО} = 63$ МВА)		ДСП-10 ($S_{ПТ} = 7,5$ МВА) ($U_{НН} = 6$ кВ) ($S_{Т,ГПП,ТОТ} = 40$ МВА)	
	При $b=1,1$	Погрешности при $b=1,0, \%$	При $b=2,5$	Погрешности при $b=1,0, \%$	При $b=1,2$	Погрешности при $b=1,0, \%$	При $b=3,6$	Погрешности при $b=1,0, \%$
$I_{ДСП.2}$, кА	33,48	0	21,81	0	19,75	0	7,53	0
$P_{ДСП}$, МВт	15,54	0,23	14,9	3,3	10,48	0,39	1,86	2,42
$Q_{ДСП}$, Мвар	14,28	0,17	7,81	4,47	6,48	0,51	1,18	3,04
$S_{ДСП}$, МВА	21,1	0,2	16,82	3,55	12,32	0,42	2,2	2,59
$P_{дуги}$, МВт	14,02	0,26	13,6	3,61	9,64	0,42	1,67	2,69
$G_{ДСП}$, т/ч	20,64	0,51	32,64	4,42	30,92	0,51	3,74	3,55
$W_{уд}$, кВт·ч/т	752,6	- 0,28	456,4	- 1,08	388,8	- 0,35	496,4	- 1,18
$\delta U_{у,ГПП}$, %	- 2,09	- 8,93	- 5,74	- 58,2	- 2,59	- 16,25	- 3,55	- 71,37
$\delta U_{т,ГПП}$, %	0,7	- 9,03	3,82	- 58,2	0,86	- 16,25	1,18	- 71,37
m_t , о.е.	0,59	- 0,42	0,44	- 12,3	0,44	- 1,57	0,47	- 8,72

В таблице также приведены погрешности определения представленных характеристик ДСП и показателей качества напряжения на шинах питания ДСП при $b = 1$, т.е. при неучете представленных ранее коэффициентов потерь мощности в СЭС.

Из таблицы видно, что при неучете коэффициента b наибольшие погрешности при определении электрических и рабочих характеристик ДСП наблюдаются для ДСП-10 с $b = 3,6$, ДСП-40 с $b = 2,5$, питающихся от трехобмоточного трансформатора, но, в целом, погрешности не превышают 5%, что допустимо для электротехнических расчетов. Однако неучет коэффициентов b существенно отражается на точности определения показателей качества напряжения в СЭС. При этом, как видно из таблицы, погрешности при определении их значений (колебаний и отклонений напряжения) достигают значительных величин – от 9 до 72%, что предопределяет необходимость учета коэффициентов потерь мощности b в СЭС при их определении с нагрузкой любых ДСП, особенно ДСП средней и малой мощности.

Таким образом, полученные коэффициенты потерь мощности в СЭС b позволяют усовершенствовать метод расчета электрических и рабочих характеристик ДСП, повысить точность расчета электротехнологических режимов ДСП, показателей качества напряжения в СЭС, а также условий обеспечения электромагнитной совместимости ДСП с СЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Салтыков В.М., Салтыкова О.А.* Электромагнитная совместимость дуговых сталеплавильных печей в системах электроснабжения промышленных предприятий: Учеб. пособ. Самара: Изд-во СамГТУ, 2005. 107 с.; ил.
2. *Салтыков В.М., Салтыкова О.А., Салтыков А.В.* Влияние характеристик дуговых сталеплавильных печей на качество напряжения в системах электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 2006. 245 с.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2007 г.