

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Синчук О. Н., д.т.н., проф.

*Кременчугский государственный политехнический университет им. М. Остроградского
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

E-mail: energy@polytech.poltava.ua.

Мельник О. Е., ассистент

Международная академия управления персоналом (Криворожский филиал)

У статті викладені результати аналітичних досліджень оцінки втрат електричної енергії в елементах тягових електричних двигунів постійного струму послідовного збудження при імпульсному регулюванні напруги їх живлення.

Ключові слова: електрична енергія, тягові електричні двигуни, рудникові електровози.

In the articles expounded results of analytical researches of estimation of losses of electric energy are in the elements of hauling electric engines of direct-current of successive excitation at the impulsive adjusting of tension of their feed.

Keywords: electric energy, hauling electric engines, mine electric locomotives.

Введение. Наибольшую часть в общей энергоёмкости добычи полезных ископаемых (ПИ) в Украине, основными из которых являются руда и уголь, составляет удельный расход электроэнергии – от 38,6 до 61,6%. При этом важно, что тенденция к уменьшению этих показателей пока не просматривается. Так, в большинстве угольных шахт страны при снижении объемов производства более чем в 2 раза, потребление электрической энергии уменьшилось лишь на 60 %, а по отдельным горнорудным предприятиям Украины доля энергетических затрат в себестоимости добычи ПИ за последние 10 лет увеличилось в 4-6 раз.

Как свидетельствуют исследования, 55–65 % общего объема энергопотребления шахт расходуется на доставку ПИ от места добычи на поверхность [1].

Актуальность исследований. Замена существующих электроэнергонезэффективных резисторных систем управления тяговым электроприводом рудничных электровозов позволит горнорудным предприятиям ежегодно экономить до 10 % потребляемой электрической энергии, снизить эксплуатационные расходы ВШТ на 20–25 % и таким образом сделать реальный шаг к желаемому снижению себестоимости добываемых ПИ [2]. В настоящее же время, помимо ежегодно увеличивающихся объемов потребления электроэнергии, увеличиваются и объемы затрат на обслуживание и ремонт подвижного состава, 55–65% от которых – это затраты на ремонт и обслуживание тягового электропривода (ТЭП) электровозов.

В свою очередь, остается крайне низкой надежность работы электрооборудования электровозов в подземных условиях: срок службы тяговых двигате-

лей в среднем не превышает 1-2-х месяцев, контроллеров – 3-4-х месяцев. При этом, к вышеизложенному следует добавить известный факт, что около 40-50% потребляемой рудничным электровозом электрической энергии от питающей контактной сети (ПКС) теряется в пуско-регулирующих реостатах [2].

Таким образом очевидно, что данные системы управления ТЭП, являясь неэкономичными и неэффективными, требуют своей скорейшей замены на современные, более эффективные [3].

Анализ возможных направлений разрешения проблемы свидетельствует о следующем [3]:

- продолжение машиностроительными заводами Украины (НПО «Электровозостроение» (г. Днепропетровск), «Дружковский машиностроительный завод» (г. Дружковка)) выпуска, а горными предприятиями закупок и эксплуатации электровозов с прежней системой тягового электропривода усугубляет проблему электроэнергосбережения на рудничном электротранспорте, а следовательно, усугубляет элементы кризиса в угле- и рудодобывающих отраслях страны;

- переориентация отечественных потребителей на закупку зарубежных РЭ, оборудованных современными системами тягового электропривода, – экономически нецелесообразна и усложняется дополнительно еще и тем, что совместная эксплуатация двух принципиально различных видов РЭ (отечественных и зарубежных) в условиях одного и того же предприятия (рудника) затруднена;

- создание отечественных РЭ с тяговым электроприводом переменного тока, являясь перспективным направлением, все же требует длительного времени на разработку, проектирование, освоение

выпуска и внедрение новых не апробированных систем в практику горных предприятий;

- реальным направлением решения проблемы РЭ в настоящее время является модернизация тягового электропривода постоянного тока путем использования новых прогрессивных технических решений и передовых технологий, а именно широтно-импульсных преобразователей на базе IGBT – модулей, конструктивно унифицированных, но совмещающих разнообразные функции, благодаря чему возможно создание компактных устройств, содержащих минимум полупроводниковых и контактных аппаратов, следовательно, самых дешевых, надежных, экономичных по потребляемой электроэнергии, затратам на обслуживание, ремонт, и, главное, – реализуемых в сжатые сроки.

Цель работы - получение аналитических выражений – основы построения алгоритмов управления импульсными преобразователями ТЭД по критерию минимума потерь электрической энергии в последних.

Материал и результаты исследований. Сложность электромагнитных процессов, протекающих в ТЭД с импульсным питанием, разнообразие требований, предъявляемых к ним, затрудняют исчерпывающую формализацию задачи оценки электрических потерь в ТЭД. Поэтому структура исследований, предполагающая акцент на оценку электрических потерь только в обмотках якоря, ни в коей мере не может претендовать на решение задачи полной оценки электрических потерь в ТЭД.

Оценку электрических потерь в ТЭД при импульсном питании рассмотрим применительно к традиционному виду ТЭД постоянного тока последовательного возбуждения.

Как известно [4], в ТЭД потери мощности в якоре определяются по выражению:

$$P_0 = I^2 \cdot R, \quad (1)$$

где I , R - ток и сопротивление якоря. Так как ток является функцией времени, средние потери в обмотке якоря за время T_0 будут равны интегралу:

$$P_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I^2(t) \cdot R dt. \quad (2)$$

Учитывая, что на величину тока якоря накладывают ограничения конструкционные особенности ТЭД, определяемые дифференциальными уравнениями, представляющими собой математическую модель двигателя, эта величина тока будет удовлетворять уравнению:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = U - E, \quad (3)$$

где L – суммарная индуктивность дросселя и якорной цепи двигателя; U - напряжение на зажимах якоря; E - э.д.с. якоря, определяемая как:

$$E = C\Phi n; \quad (4)$$

$$C = \frac{P \cdot N}{\alpha}; \quad (5)$$

P - число пар полюсов; N - число активных провод-

ников обмотки; α - число пар параллельных ветвей обмотки; Φ - магнитный поток в воздушном зазоре, приходящийся на один главный полюс двигателя; n - частота вращения якоря.

Электромагнитный момент двигателя:

$$M = \frac{C}{2\pi} \Phi I, \quad (6)$$

вызывает изменение частоты вращения:

$$J \cdot 2\pi \frac{dn}{dt} = M - M_H, \quad (7)$$

где J - момент инерции якоря; M_H - момент нагрузки.

Приравняв M из (6) и (7), получим:

$$\frac{C}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I = J \cdot 2\pi \frac{dn}{dt} + M_H. \quad (8)$$

Подставляя (4) в (3) с учетом (8), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} + I \cdot R + C \cdot \Phi \cdot n = U; \\ 2\pi J \frac{dn}{dt} = \frac{C}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I - M_H. \end{cases} \quad (9)$$

Напряжение U в (9), являясь выходной переменной импульсного преобразователя, задается выражением:

$$U = U_0 \sum_{K=0}^{\infty} [1(t - KT) - 1(t - (k + \gamma)T)], \quad (10)$$

где U_0 - напряжение источника питания,

$$1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

T - период импульса; γ - скважность импульса.

При последовательном возбуждении ТЭД ток якоря одновременно является также током возбуждения, поэтому можно записать:

$$\Phi = f(I). \quad (11)$$

Функция (11) определяется магнитной характеристикой ТЭД.

Подставляя (11) в (9), получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} + IR + C \cdot f(I) \cdot n = U; \\ 2\pi J \frac{dn}{dt} = \frac{C}{2\pi} \cdot f(I) \cdot I - M_H. \end{cases} \quad (12)$$

Система уравнений (12), являясь нелинейной, не имеет аналитического решения, что требует привлечения численных методов. Для приближенного решения системы (12) имеет смысл воспользоваться "методом возмущений" [4]. Решение (12) будем искать в виде:

$$I = I_0 + i; \quad n = n_0 + \Delta n, \quad (13)$$

где I_0 , n_0 - ток и частота вращения якоря, соответствующие установившемуся режиму при среднем напряжении на зажимах якоря; i , Δn - отклонения тока и частоты вращения от значений I_0 , n_0 , предполагающиеся малыми по сравнению с I_0 , n_0 .

Принимая во внимание (13), формулу (11) можно представить в виде:

$$\Phi = f(I_0) + f'(I_0) \cdot i. \quad (14)$$

Величины I_0 и n_0 находятся путем решения системы алгебраических уравнений, получающейся из (12) путем приравнивания нулю производных:

$$\begin{aligned} f(I_0) \cdot I_0 &= \frac{2\pi}{C} \cdot M_H; \\ n_0 &= \frac{\bar{U} - I_0 \cdot R}{C \cdot f(I_0)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^{T_0} U \cdot dt. \quad (16)$$

Подставляя (14) в (12) с учетом найденных значений по формулам (15), пренебрегая величинами второго порядка малости и исключая Δn из системы уравнений, получим линейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\begin{aligned} L \frac{d^2 i}{dt^2} + C f'(I_0) \cdot n_0 \cdot \frac{di}{dt} + \frac{C^2}{4\pi^2} (f(I_0) + \\ + f'(I_0) \cdot I_0) i = \frac{dU}{dt}. \end{aligned} \quad (17)$$

Так как напряжение U является периодической функцией (10), то удобно для решения (17) воспользоваться разложением в ряд Фурье, которое имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} = \frac{U_0}{T} \sum_{m=1}^{\infty} \left[(1 - \cos(\pi m \gamma)) \cos\left(\frac{\pi m}{T} t\right) - \right. \\ \left. - \sin(\pi m \gamma) \cdot \sin\left(\frac{\pi m}{T} t\right) \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда решение (17) имеет вид:

$$\begin{aligned} i = \sum_{m=1}^{\infty} \left(A_m \cos\left(\frac{\pi m}{T} t\right) + B_m \sin\left(\frac{\pi m}{T} t\right) \right) + \\ + \frac{i'_0 - K_2 i_0}{K_1 - K_2} e^{K_1 t} + \frac{i'_0 - K_1 i_0}{K_2 - K_1} e^{K_2 t}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $K_1 = \frac{\alpha + \sqrt{D}}{2L}$; $K_2 = \frac{-\alpha - \sqrt{D}}{2L}$;
 $\alpha = C \cdot f'(I_0) n_0$; $D = \alpha^2 = 4L \cdot v$;

$v = \frac{C^2}{4\pi^2} (f(I_0) + f'(I_0) I_0)$, i_0 , i'_0 - начальные значения тока $i(t)$ и его производной,

$$A_m = U_0 \frac{(1 - \cos(\pi m \gamma)) \left(v - L \left(\frac{\pi m}{T} \right)^2 \right) - \sin(\pi m \gamma) \cdot \frac{\pi m \alpha}{T}}{\Delta m};$$

$$B_m = U_0 \frac{(1 - \cos(\pi m \gamma)) \alpha \frac{\pi m}{T} + \sin(\pi m \gamma) \left(v - L \left(\frac{\pi m}{T} \right)^2 \right)}{\Delta m};$$

$$\Delta m = \left[v - L \left(\frac{\pi m}{T} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\pi m}{T} \right)^2 \cdot \alpha^2.$$

Средние потери мощности, определяемые (2), можно представить выражением

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{T_0} (I_0 + i)^2 \cdot R dt. \quad (20)$$

В установившемся режиме ($T_0 \rightarrow \infty$) влиянием начальных условий в (19) можно пренебречь и тогда (20) примет вид:

$$P = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} (I_0^2 \cdot R) dt + \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} (i^2 \cdot R) dt. \quad (21)$$

Второе слагаемое в (21) характеризует средние потери в якоре, вызванные пульсирующей составляющей тока вследствие импульсного способа регулирования ТЭД.

Выводы. Полученные аналитические выражения, оценивая потери электрической энергии в ТЭД при импульсном питании, позволяют создать алгоритм управления ТЭП с оптимальным режимом функционирования, оптимальными параметрами ТЭД и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азарян А. А., Вілкул Ю.Г., Капленко Ю.П., Караманиць Ф.І. та др. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв. – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.
2. Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышев А.А., Синчук И.О., Удовенко О.А., Пасько О.В., Гузов Э.С. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / Под редакцией д.т.н. О.Н. Синчука. Научное издание НАН Украинский институт электродинамики. – К.: 2006. – 250 с.
3. Синчук О.Н., Синчук И.О., Лебедин С.В., Удовенко О.А., Пасько О.В. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Технічні науки. Серія Транспорт, №8(102), Т. 2– Луганськ, 2006. – с 81-92.
4. Синчук О.Н. К вопросу управления тяговой нагрузкой рудничных электровозов. Изв. ВУЗов. Электромеханика.– 1985, №3. – с.92-95.

Стаття надійшла 28.03.2008 р.