

УДК: 62-83:629

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ТИПА ЭТ-45(46) ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

Синчук О.Н, д.т.н., проф., Черная В.О., асп.

Кременчугский государственный политехнический университет  
имени Михаила Остроградского

Мельник О.Е., магис.

Международная академия управления персоналом, Криворожский филиал  
39614 г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20

E-mail: [energy@polytech.poltava.ua](mailto:energy@polytech.poltava.ua)

Викладена запропонована методика та результати експериментальних досліджень додаткових втрат потужності при імпульсному регулюванні напруги живлення тягових електричних двигунів постійного струму.

**Ключевые слова:** тяговий електричний двигун постійного струму, імпульсне регулювання, втрати потужності.

It is stated offered methods and results of experimental studies of additional losses to powers under pulsed regulation of voltage of power supply the tractive electric engines of direct current.

**Key words:** tractive electric engine of direct current, pulsed regulation of loss to powers.

**Введение.** Замена неэффективных резисторно-контакторных систем тяговых электроприводов (ТЭП) на современные электроэнергоэкономичные системы с импульсным регулированием напряжения тяговых электрических двигателей (ТЭД) постоянного тока требует исследования и оценки дополнительных потерь электрической энергии (ЭЭ), вызываемых импульсными преобразователями [1].

**Анализ предыдущих исследований.** В работах [2,3] изложены основные аспекты оценки дополнительных потерь ЭЭ в ТЭД постоянного тока при импульсном регулировании напряжения питания. Однако сложность аналитических исследований данного вопроса требует экспериментальной проверки полученных результатов.

**Цель работы.** Установление степени достоверности потерь ЭЭ в ТЭД постоянного тока при импульсном регулировании напряжения питания.

**Материалы и результаты исследований.** Комплекс экспериментальных исследований проводился на основе специально разработанной для этой цели программы.

Методика проведения эксперимента предполагала определение величины и характера изменения слагаемых потерь энергии в элементах ТЭД. При этом, с целью возможности сопоставления результатов составляющих мощностей, выполнялось условие постоянства нагрузки на валу и частоты вращения испытуемого двигателя, т.е. условие равенства полезных мощностей.

Исследования проводились на специальном стенде (рис. 1), оборудованном серийными рудничными тяговыми двигателями постоянного тока типа ЭТ-45/46 и в промышленных условиях эксплуатации

электровозов, оснащенных с целью сопоставимости данных этими же типами двигателей.

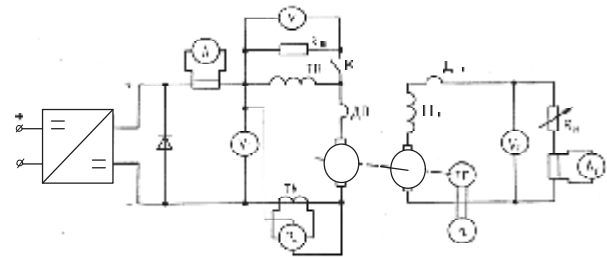


Рисунок 1 – Схема испытательного стенда

Измерению подлежали как суммарная потребляемая двигателями мощность  $P_{\Sigma}$ , так и её слагаемые – постоянная  $P_{-}$  и переменная  $P_{-}$  составляющие.

В ходе экспериментов был получен обширный экспериментальный материал по всему объему необходимой информации. С целью минимизации количества опытов и представления материалов эксперимента в виде, удобном для анализа, использовался модернизированный аппарат теории планирования многофакторного эксперимента. При этом определение постоянной составляющей потерь предусматривало нахождение выражений для среднего значения тока двигателя и среднего значения напряжения на нем. Интервалы варьирования независимых переменных выбирались, исходя из реального диапазона их изменения [2,3].

В качестве независимых переменных использовались:

$X_1$  – ток генератора, А;  
 $X_2$  – частота комутації імпульсного регулятора, Гц;  
 $X_3$  – скважність імпульсов.  
 Параметри інтерполяції представлені:  
 $Y'_n, Y''_n$  – значення вихідних параметрів;  
 $n$  – кількість вихідних параметрів;  
 $\bar{Y}_n$  – середнє значення вихідного параметра;  
 $Y_n$  – передбачане значення вихідного параметра.

В табл. 1 приведені вихідні дані для планування експерименту.

**Таблиця 1 – Вихідні дані для планування експерименту**

План	Умовля опыта	Обозначення	Факторы		
			$X_1$ , А	$X_2$ , Гц	$X_3$
ДФЭ2 <sup>3</sup>	Верхний уровень	$x_{ив}$	160	400	0,6
	Нижний уровень	$x_{ин}$	120	200	0,4
	Нулевой уровень	$x_{ю}$	140	300	0,5
	Интервал варьирования	$\Delta x_i$	20	100	0,1

**Таблиця 2 – Результати реалізації матриці планування ДФЭ2<sup>3</sup>**

$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$Y_3''$	$\bar{Y}_3''$	$\bar{Y}_3$	$\bar{Y}_3$	$Y_4'$
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	115,7	114	114,85	115,6	1,463
+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	103,4	102	102,7	101,93	3,137
+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	98	98,4	98,2	97,43	1,748
+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	82	84	83	83,75	3,496
+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	140	143,7	141,85	141,75	1,477
+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	124	125,6	124,8	124,77	3,183
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	119	121,2	120,1	120,15	1,812
+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	102	104,7	103,35	103,2	3,404
	0	0	0	0	0	0			110,6		

Продолжение таблицы 2

$Y_4''$	$\bar{Y}_4$	$Y_1'$	$Y_1''$	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_1$	$Y_2'$	$Y_2''$	$\bar{Y}_2$	$\bar{Y}_2$
1,463	1,463	192	192,6	192,3	193,1	170	171	170,5	171,66
3,036	3,086	172	174	173	172,3	150	150	150	150,3
1,803	1,775	164	164	164	164,3	141	143	142	142,3
3,487	3,491	145,5	142,1	143,8	143,5	122	123	122,55	120,94
1,472	1,474	201	202,4	200,7	201,7	182	186	184	182,7
3,202	3,192	180	182	161	181	160	163	161,5	161,3
1,863	1,837	172	176	174	173	152	155	153,5	153,3
3,542	3,472	149	153	151	152	129	132	130,5	131,9
	2,18								

Поэтому общим видом математической модели для Р был выбран квадратичный полином. Для использования уже проведенных опытов применялся метод центрального композиционного

В результате реализации матрицы планирования ДФЭ2<sup>3</sup> (табл. 2), ее математической обработки получены уравнения регрессии в натуральных обозначениях:

для постоянной составляющей тока двигателя, А:  

$$I_{\partial\partial} = 1,06 + 1,135I_G + 0,0116f \quad (2)$$

Для среднего значения напряжения на двигателе, В

$$U_{\partial\partial} = 99,67 - 0,216I_G + 0,104f + 144g; \quad (3)$$

для угловой скорости, рад/с:

$$w = 71,86 - 0,241I_G + 0,13f + 159g - 0,0004I_G d - 0,425I_G g; \quad (4)$$

где  $I_G$  – ток генератора, А;

$I_{\partial\partial}$  – ток двигателя, А;

$f$  – частота коммутации, Гц;

$U_{\partial\partial}$  – напряжение двигателя, В;

$g$  – скважность импульсов.

Тогда  $P_{-} = U_{\partial\partial} \cdot I_{\partial\partial} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (5)$

В результате реализации матрицы планирования ДФЭ2<sup>3</sup> для переменной составляющей мощности и ее математической обработки получилось линейное уравнение регрессии, которое оказалось неадекватным.

рототабельного планирования. В результате реализации матрицы ЦКРП и ее математической обработки было получено уравнение регрессии, которое в натуральных обозначениях имеет вид:

$$P_{\sim} = (3,85 - 0,0062I_{\Gamma} - 0,008f + 1,116g + 8,44 \cdot 10^{-6} f^2 - 1,78g^2)^2, \quad (6)$$

где  $P_{\sim}$  – переменная составляющая мощности потерь, кВт.

Полная мощность потерь в ТДПТ, кВт:

$$P_{\Sigma} = U_{\delta\theta} \cdot I_{\delta\theta} \cdot 10^{-3} + P_{\sim} = P_{-} + P_{\sim}, \quad (7)$$

где  $P_{-}$  – постоянная составляющая потерь, кВт.

Полученные зависимости позволяют оценить характер распределения потерь в ТД и сравнить их с экспериментальными. Для определения полезной мощности ТД необходимо определить составляющие суммарных потерь в генераторе:

$$\sum DP_{\Gamma} = DP_{мед} + DP_{ст} + DP_{мех} + DP_{щ} + DP_{доб}, \text{ кВт} \quad (8)$$

где  $DP_{мед}$  – электрические потери, кВт;

$DP_{ст}$  – потери в стали, кВт;

$DP_{мех}$  – механические потери, кВт;

$DP_{щ}$  – потери в щеточном контакте, кВт;

$DP_{доб}$  – добавочные потери, кВт.

Электрические потери в генераторе при сопротивлении обмоток, приведенных к температуре 55°C:

$$DP_{мед} = I_{\Gamma}^2 \cdot R_{\Gamma}, \text{ кВт} \quad (9)$$

где  $R_{\Gamma} = 0,06 \text{ Ом}$ .

Механические потери определялись из опыта холостого хода.

Добавочные потери принимались в процентах от потерь в стали в зависимости от тока. Следовательно, характер изменения этих потерь подобен изменению магнитных потерь. Поэтому, в ходе дальнейших расчетов добавочные потери, потери в щетках и в стали не разделялись и считались входящими в потери стали.

Потери в стали возникают при перемагничивании стали сердечника и якоря и зависят от частоты перемагничивания, т.е. от частоты вращения и магнитной индукции:

$$DP_{СТ} = C \cdot B^2 \cdot f^{\beta}, \text{ кВт}, \quad (10)$$

где  $C$  – постоянная, зависящая от марки и от веса стали;

$B$  – магнитная индукция;

$f = \frac{Pn}{60}$  – частота перемагничивания стали;

$\beta=1,3$  – показатель степени для среднелегированной стали.

Потери в стали генератора могут быть определены из общих потерь в системе двигатель-генератор, если учесть, что параметры машин одинаковы.

Общие потери в системе двигатель-генератор равны:

$$\sum DR_{полн} = R_{потр} - R_{н}, \quad (11)$$

где  $R_{потр} = U_{\delta\theta.p} \cdot I_{\delta\theta.p}$  – мощность, потребляемая двигателем на постоянном токе;

$R_{н}$  – мощность нагрузки генератора.

Суммарные электрические потери (в меди, стали, щеточном контакте, добавочные потери) системы определены как разность

$$\sum DR_{эл.суст} = \sum DR_{полн} - \sum DR_{мех.суст}, \quad (12)$$

$\sum DR_{мех.суст}$  – механические потери системы, полученные экспериментально. Общие потери в стали системы двигатель-генератор определяются как

$$\sum DR_{ст.суст} = \sum DR_{эл.суст} - (DR_{мед.\delta\theta} - DR_{мед.\epsilon}) \quad (13)$$

или

$$\sum DR_{ст.суст} = DR_{ст.\delta\theta} + DR_{ст.\epsilon} = (CB^2 f^2)_{\delta\theta} + (CB^2 f^2)_{\epsilon}. \quad (14)$$

Поскольку в двигателе и генераторе одинаковое число полюсов и они имеют одну частоту вращения, то  $f_{\delta\theta} = f_{\epsilon}$ .

Отсюда общие магнитные потери генератора могут быть представлены соотношением:

$$DP_{ст.\epsilon} = \frac{\sum DP_{ст.суст}}{1 + (B_{\delta\theta} / B_{\epsilon})^2} = \frac{\sum DP_{ст.суст}}{1 + (\Phi_{\delta\theta} / \Phi_{\epsilon})^2}, \quad (15)$$

где  $B_{\delta\theta}, B_{\epsilon}$  – магнитная индукция при рассматриваемом режиме двигателя и генератора;

$\Phi_{\delta\theta}, \Phi_{\epsilon}$  – магнитный поток двигателя и генератора.

Таким образом, потери в стали определяются из условия пропорциональности магнитных потерь квадрату потоков.

Режим работы электродвигателей при питании от реостатной системы управления и при импульсном регулировании сравнивались при одинаковой полезной нагрузке на валу тягового двигателя. Как показал анализ материалов эксперимента, режим пульсирующего тока вызывает дополнительные потери в тяговом электродвигателе. Причем, на дополнительные потери идет практически вся переменная составляющая мощности, величина которой существенно снижается с увеличением частоты коммутации ИП. Однако увеличение частоты не оказывает столь существенного влияния на величину дополнительных пульсационных потерь в тяговом электродвигателе. Это положение иллюстрируется рис. 2, где приведена зависимость мощности пульсационных потерь от частоты при значениях тока 120, 140, 160 А. Как видим, при повышении частоты импульсного преобразователя от 100 до 500 Гц мощность дополнительных потерь от пульсации тока снижается в 3 раза. Таким образом, регулирование частоты импульсного преобразователя открывает возможность существенного снижения потерь в тяговых двигателях при импульсном регулировании.

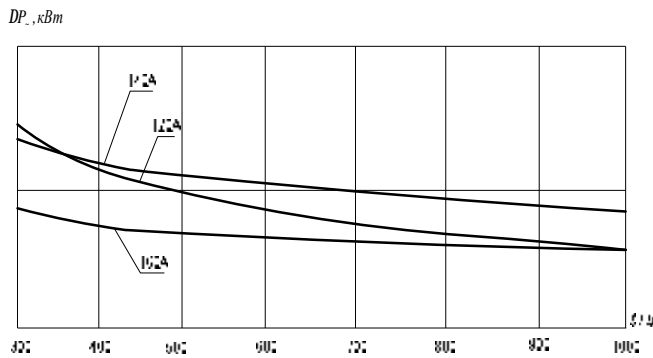


Рисунок 2 – Зависимость мощности пульсационных потерь от частоты коммутации при различных значениях тока ( $\omega = \text{const} = 105 \text{ рад/с}$ )

Интересно отметить, что пульсационные потери связаны с величиной тока неоднозначно. Так, при токах 120 и 140 А они практически одинаковы, а при токе 160 А оказываются меньше. Это побудило исследовать зависимость величины мощности потерь в функции тока при различных частотах импульсного преобразователя (рис. 3). Анализ показывает, что все характеристики имеют выраженный максимум, который располагается в диапазоне токов 100...150 А – как раз наиболее вероятных токов нагрузки. Такой характер зависимости объясняется явлением насыщения магнитной системы двигателя. При больших значениях тока (больше 150 А), несмотря на увеличение переменной составляющей тока, пульсация магнитного потока уменьшается, что и ведет к снижению мощности пульсационных потерь. При изменении частоты импульсного преобразователя величина тока, при которой достигается максимальная мощность потерь, изменяется существенно.

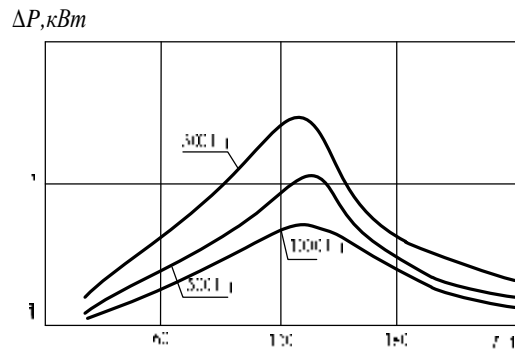


Рисунок 3 – Зависимость мощности пульсационных потерь в функции тока при различных частотах коммутации

**Выводы.** Как показали результаты экспериментов, расхождение между теоретически полученными данными и экспериментальными не превышает 4% и, следовательно, теоретически полученную математическую модель [2] можно считать адекватной объекту исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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 ред. докт. техн. н. О.Н. Синчука: Научное издание НАН Украины. Институт электродинамики. – К., 2006. – 250 с.
2. Синчук О.М., Удовенко О.О. Энергозберігаючий тяговий електропривод з імпульсним перетворювачем напруги для рудникових акумуляторних електроприводів // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2003. Вип. 10(68), ч.2. – С. 34-41.
3. Синчук О.Н., Луценко И.А., Афанасьев Е.В., Виноградов Н.В. Импульсная система управления рудничными аккумуляторными электровозами // Горный журнал. – 1991. - №2. – С. 42-43.

Стаття надійшла 26.09.2007р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.