

Синчук О.Н.,  
Буйвол Б.А.,  
Загурский Н.Н.,

Украина  
Кременчуг

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского*

Синчук И.О.,  
Гузов Э.С.,  
Мельник О.Е.

Украина  
Кривой Рог

*Криворожский технический университет*

## ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ АНАЛИЗА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

**Введение.** Установленные электрические мощности эксплуатируемых на предприятиях с подземными видами производств (шахты, рудники, спец. объекты и т.д.) промышленных электровозов сцепной массой 7-14 кН составляют около 150 МВт электрической энергии.

**Постановка задач исследования.** Последние пять лет характеризуются долго ожидаемым в Украине процессом реанимирования работ по созданию и внедрению в практику производства отечественных промышленных электровозов современных электроэнергоэффективных тяговых электротехнических комплексов с импульсными системами преобразования (регулирования) напряжения питания электрических двигателей. При этом, в ряде научных работ приводятся данные о параметрах новых систем: КПД, экономии электрической энергии и т.д. [1,2]. Однако, как правило, эти значения относятся к разряду ожидаемых параметров. Для получения значений, характеризующих истинную электроэнергоэффективность новых систем необходимы экспериментальные (натурные) исследования по установлению реальной оценки этих показателей. При этом, для чистоты ожидаемых экспериментов необходимо решить двудеиную задачу: создать адекватный экспериментальный комплекс максимально приближенный к реальному образцу и выбрать оптимальный математический аппарат для обработки получаемых данных.

С целью установления реальных значений потерь электрической энергии в главном слагаемом всего электротехнического комплекса – тяговых двигателях авторами были проведены исследования на лабораторном стенде (рис. 1) с реальными тяговыми двигателями ДТН-45 и реальным тяговым импульсным преобразователем напряжения их питания на основе специально разработанной для этой цели программы [2].\*

**Цель исследования.** Получение реальных зависимостей уровней потерь электрической энергии в тяговых двигателях при импульсном регулировании напряжения их питания в функции частоты и величины тока коммутации импульсного преобразователя.

**Материалы исследования.** Методика проведения эксперимента предполагала определение величины и характера изменения слагаемых потерь энергии в элементах тяговых электрических двигателей (ТЭД). При этом, с целью корректности сопоставления результатов составляющих мощностей выполнялось условие постоянства нагрузки на валу и частоты вращения испытуемого двигателя, то есть условие равенства полезных мощностей.

Измерению подлежали как суммарная потребляемая двигателями мощность  $P_{\Sigma}$ , так и её слагаемые – постоянная  $P_{\text{п}}$  и переменная  $P_{\text{в}}$  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 [3].

При этом, определение постоянной составляющей потерь предусматривало нахождение выражений для среднего значения тока двигателя и среднего значения напряжения на его зажимах. Интервалы варьирования независимых переменных выбирались исходя из реального диапазона их изменения [3].

В качестве независимых переменных использовались:

$X_1$  - ток генератора, А;

$X_2$  - частота коммутации импульсного регулятора, Гц;

$X_3$  - скважность импульсов

Параметры интерполяции представлены:

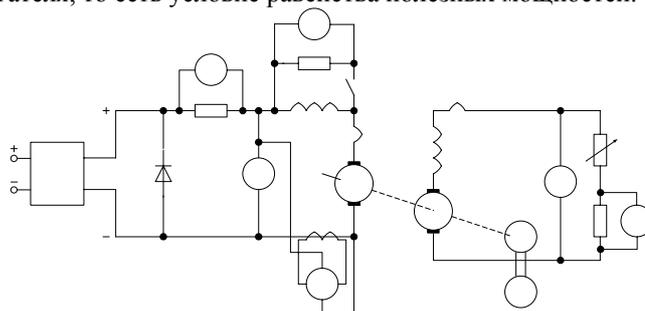


Рис. 1. Схема испытательного стенда

\* тяговые двигатели ДТН-45, производства ОАО "Электромашина" (г. Харьков) эксплуатируются на промышленных электровозах К 14 и 14 КР

$Y_n'$ ,  $Y_n''$  - значения выходных параметров;  
 n - количество выходных параметров;  
 $\bar{Y}_n$  - среднее значение выходного параметра;  
 $\hat{Y}_n$  - предсказанное значение выходного параметра.

В табл.1 приведены исходные данные для планирования эксперимента.

Таблица 1

План	Условия опыта	Обозначения	Факторы		
			X <sub>1</sub> , А	X <sub>2</sub> , Гц	X <sub>3</sub>
ПФЭ2 <sup>3</sup>	Верхний уровень	x <sub>ив</sub>	160	400	0,6
	Нижний уровень	x <sub>ин</sub>	120	200	0,4
	Нулевой уровень	x <sub>ио</sub>	140	300	0,5
	Интервал варьирования	Δx <sub>i</sub>	20	100	0,1

В результате реализации матрицы планирования ПФЭ2<sup>3</sup> (табл. 2), её математической обработки, получены уравнения регрессии в натуральных обозначениях:

для постоянной составляющей тока двигателя, А

$$I_{дв} = 1,06 + 1,135I_{Г} + 0,0116f; \quad (1)$$

Для среднего значения напряжения на двигателе, В

$$U_{дв} = 99,67 - 0,216I_{Г} + 0,104f + 144\gamma; \quad (2)$$

для угловой скорости, рад/с

$$\omega = 71,86 - 0,24I_{Г} + 0,13f + 159\gamma - 0,0004I_{Г}\delta - 0,425I_{Г}\gamma, \quad (3)$$

где I<sub>Г</sub> - ток генератора, А;

I<sub>дв</sub> - ток двигателя, А;

f - частота коммутации, Гц;

U<sub>дв</sub> - напряжение двигателя, В;

γ - скважность импульсов.

Тогда:  $P_{-} = U_{дв} \cdot I_{дв} \cdot 10^{-3}$ , кВт. (4)

В результате реализации матрицы планирования ПФЭ2<sup>3</sup> для переменной составляющей мощности и её математической обработки получилось линейное уравнение регрессии, которое оказалось неадекватным. Поэтому общим видом математической модели для Р был выбран квадратичный полином. Для использования уже проведенных опытов применялся метод центрального композиционного рототабельного планирования. В результате реализации матрицы ЦКРП и её математической обработки было получено уравнение регрессии, которое в натуральных обозначениях имеет вид:

Таблица 2

X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>3</sub> '	$\bar{Y}''_3$	$\bar{Y}_3$	$\hat{Y}_3$	Y <sub>4</sub> '
+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 табл. 2

Y <sub>4</sub> '	$\bar{Y}_4$	Y <sub>1</sub> '	Y <sub>1</sub> ''	$\bar{Y}_1$	$\hat{Y}_1$	Y <sub>2</sub> '	Y <sub>2</sub> ''	$\bar{Y}_2$	$\hat{Y}_2$
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								

В результате реализации матрицы планирования ПФЭ2<sup>3</sup> для переменной составляющей мощности и её математической обработки получилось линейное уравнение регрессии, которое оказалось неадекватным. Поэтому

общим видом математической модели для Р был выбран квадратичный полином. Для использования уже проведенных опытов применялся метод центрального композиционного рототабельного планирования. В результате реализации матрицы ЦКРП и её математической обработки было получено уравнение регрессии, которое в натуральных обозначениях имеет вид:

$$P_{\sim} = (3,85 - 0,0062I_{\Gamma} - 0,008f + 1,116\gamma + 8,44 \cdot 10^{-6}f^2 - 1,78\gamma^2)^2, \quad (5)$$

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

Полная мощность потерь в ТДПТ, кВт

$$P_{\Sigma} = U_{\text{дв}} \cdot I_{\text{дв}} \cdot 10^{-3} + P_{\sim} = P_{-} + P_{\sim}, \quad (6)$$

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

Полученные зависимости позволяют оценить характер распределения потерь в ТЭД и сравнить их с экспериментальными.

Для определения полезной мощности ТЭД необходимо было определить составляющие суммарных потерь в генераторе:

$$\sum \Delta P_{\Gamma} = \Delta P_{\text{мед}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{доб}}, \text{ кВт} \quad (7)$$

где  $\Delta P_{\text{мед}}$  - электрические потери, кВт;

$\Delta P_{\text{ст}}$  - потери в стали, кВт;

$\Delta P_{\text{мех}}$  - механические потери, кВт;

$\Delta P_{\text{щ}}$  - потери в щеточном контакте, кВт;

$\Delta P_{\text{доб}}$  - добавочные потери, кВт.

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

$$\Delta P_{\text{мед}} = I_{\Gamma}^2 \cdot R_{\Gamma}, \text{ кВт} \quad (8)$$

где  $R_{\Gamma} = 0,06$  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 тягового двигателя возникают при перемагничивании сердечника и якоря и зависят от частоты перемагничивания, то есть от частоты вращения и магнитной индукции

$$\Delta P_{\text{СТ}} = C \cdot B^2 \cdot f^{\beta}, \text{ кВт}, \quad (9)$$

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

$B$  - магнитная индукция;

$f = \frac{P_{\text{п}}}{60}$  - 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:

$$\sum \Delta P_{\text{полн}} = P_{\text{потр}} - P_{\text{н}}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{потр}} = U_{\text{дв.р}} \cdot I_{\text{дв.р}}$  - мощность, потребляемая двигателем на постоянном токе;

$P_{\text{н}}$  - мощность нагрузки генератора.

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

$$\sum \Delta P_{\text{эл.сист}} = \sum \Delta P_{\text{полн}} - \sum \Delta P_{\text{мех.сист}}, \quad (11)$$

$\sum \Delta P_{\text{мех.сист}}$  - механические потери системы, полученные экспериментально. Общие потери в стали системы двигатель-генератор определяются

$$\sum \Delta P_{\text{ст.сист}} = \sum \Delta P_{\text{эл.сист}} - (\Delta P_{\text{мед.дв}} - \Delta P_{\text{мед.г}}) \quad (12)$$

или

$$\sum \Delta P_{\text{ст.сист}} = \Delta P_{\text{ст.дв}} + \Delta P_{\text{ст.г}} = (CB^2f^2)_{\text{дв}} + (CB^2f^2)_{\text{г}}. \quad (13)$$

Поскольку в двигателе и генераторе одинаковое число полюсов и они имеют одну частоту вращения, то  $f_{\text{дв}} = f_{\text{г}}$ .

Отсюда общие магнитные потери генератора могут быть представлены соотношением

$$\Delta P_{\text{ст.г}} = \frac{\sum \Delta P_{\text{ст.сист}}}{1 + (B_{\text{дв}}/B_{\text{г}})^2} = \frac{\sum \Delta P_{\text{ст.сист}}}{1 + (\Phi_{\text{дв}}/\Phi_{\text{г}})^2}, \quad (14)$$

где  $B_{\text{дв}}, B_{\text{г}}$  - магнитная индукция при рассматриваемом режиме двигателя и генератора;

$\Phi_{дв}, \Phi_{г}$  - магнитный поток двигателя и генератора.

Таким образом, потери в стали ТЭД определяются из условия пропорциональности магнитных потерь квадрату потоков [3].

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 импульсного преобразователя тягового электротехнического комплекса. 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 от 500 Гц и выше открывает возможность существенного снижения потерь в тяговых двигателях при импульсном регулировании.

Вместе с тем, интересно отметить, что "логика" изменения уровня пульсационных потерь связанных с величиной тока не однозначна. Так при токах 120 и 140 А они (потери) 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). Как показали результаты исследований все характеристики имеют явно выраженный максимум, который располагается в диапазоне токов 100...150 А - как раз наиболее вероятных значений токов нагрузки.

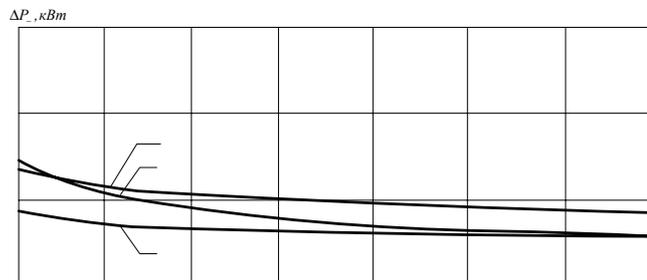


Рис. 2. Зависимость мощности пульсационных потерь в тяговом электрическом двигателе ДТН - 45 от частоты коммутации при различных значениях тока ( $\omega = \text{const} = 105 \text{ рад/с}$ )

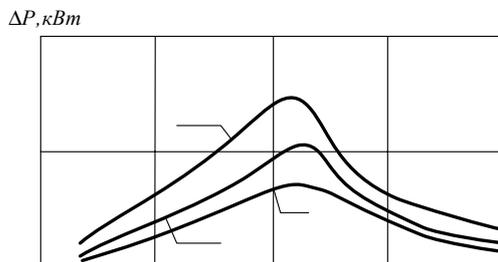


Рис. 3. Зависимость мощности пульсационных потерь в тяговом двигателе ДТН-45 в функции тока при различных частотах коммутации

Такой характер зависимости объясняется явлением насыщения магнитной системы двигателя тяговых двигателей. 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 несущественно.

**Выводы.** 1. Оптимальная частота коммутации импульсного преобразователя тягового электротехнического комплекса средней мощности должна быть выше 500 Гц.

2. Максимальные значения мощности пульсационных потерь в тяговых двигателях независимо от частоты коммутации лежат в пределах рабочих значений токов 100-150 А.

#### 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 редакцией доктора технических наук О.Н. Синчука. Научное издание НАН Украины. Институт электродинамики. К.: 2006, 250с.

2. Синчук О.Н., Мельник О.Е., Черная В.О. Экспериментальная оценка потерь электрической энергии в тяговых двигателях типа ЭТ-45(46) при импульсном регулировании напряжения питания // №6. Част. 2, 2007. ҚДПУ, с.

3. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. – К.: Техніка. – 1981. – 200 с.