

**М. В. ЧЕРНЯВСКАЯ, И. Т. КАРПАЛЮК, М. Л. ГЛЕБОВА** кандидаты технических наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

### **АНАЛИЗ ВЫСШИХ ВРЕМЕННЫХ ГАРМОНИК ТОКОВ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

По статистическим моделям определены величины относительной погрешности при замене реальной кривой фазного тока статора вентильного двигателя постоянного тока на идеализированную, а также уровни высших гармоник в зависимости от параметров вентильного двигателя постоянного тока.

По статистичних моделях визначені величини відносної погрішності при заміні реальною кривою фазного струму статора вентильного двигуна постійного струму на ту, що ідеалізується, а також рівні вищих гармонік залежно від параметрів вентильного двигуна постійного струму.

**Ключевые слова:** синхронная машина, вентильный двигатель, система дифференциальных уравнений.

В теории вентильных двигателей широко используются приближенные описания фазного тока в виде трапециидальной функции времени. На этом предположении получены многие аналитические выражения для добавочных потерь, пульсирующих составляющих моментов, статических характеристик вентильных двигателей постоянного тока (ВДПТ). Поэтому, представляется целесообразным проводить анализ не только собственно гармонического состава токов ВДПТ, но и погрешности его определения по отношению к идеализированной трапециидальной кривой. Такой подход даст возможность предложить более простые и, в тоже время, более точные модели, позволяющей откорректировать приближенные зависимости.

Для трапеции, после разложения в ряд Фурье, амплитуды высших временных гармоник (ВВГ) можно найти по формуле:

$$I_{\mu\tau} = \frac{8}{\pi\gamma_k} \cdot I_d \cdot \frac{\sin(\mu\gamma_k/2)}{\mu} \cdot \cos(\mu\pi/6) \quad (1)$$

где  $\gamma_k$  - угол коммутации;  $I_d$  - амплитуда основной гармоники;  $\mu$  - номер гармоники ( $\mu = 6n \pm 1$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

Величину относительной погрешности определим в виде:

$$\Delta\mu = \frac{\sum_{\mu} I_{\mu}^2 - \sum_{\mu} I_{\mu\tau}^2}{\sum_{\mu} I_{\mu\tau}^2} \quad (2)$$

где  $\sum_{\mu} I_{\mu}^2$ ;  $\sum_{\mu} I_{\mu\tau}^2$  - сумма квадратов высших гармоник по реальной и трапециидальной форме

кривой тока соответственно. Реальная кривая тока вентильного двигателя существенно отличается от идеализированной, что подтверждается данными таблица, рассчитанными по математической модели [1, 2], путем их сравнения с трапециидальной формой кривой тока статора по формуле (2). В таблице представлена также величина относительной погрешности  $\Delta I\mu$ , рассчитанная по формуле (2) с разницей в том, что для ВДПТЗ -  $\Delta I\mu$  - включает лишь пятую и седьмую гармоники ( $\mu = 5, 7$ ), а при ВДПТ6 - все тоже - лишь  $\Delta I\mu$  включает одиннадцатую и тринадцатую гармоники ( $\mu = 11, 13$ ). В подтверждение необходимости определения величины относительной погрешности при учете высших временных гармоник тока статора ВДПТ, рассмотрим крайние значения  $\Delta\mu$  и  $\Delta I\mu$  для ВДПТЗ и ВДПТ5, в зависимости от двух групп факторов по таблица. Так, для ВДПТЗ значения крайних точек относительной погрешности равны:

а) для первой группы факторов ( $\beta_0, x_{op}, i_f, i_d$ )

$$\Delta\mu_{max} = 0,74 \quad (14.)$$

$$\Delta I\mu_{max} = 1,19 \quad (14.)$$

$$\Delta\mu_{min} = 0,08 \quad (10.)$$

$$\Delta I\mu_{min} = 0,13 \quad (10.)$$

где в скобках указан номер опыта, по данным которого получены соответствующие величины относительной погрешности (таблица).

б) для второй группы факторов ( $x_{\sigma}, x_{\sigma db}, x_{ad}$ )

$$\Delta\mu_{max} = 0,49 \quad (13.)$$

$$\Delta I\mu_{max} = 0,83 \quad (13.)$$

$$\Delta\mu_{min} = 0,21 \quad (2.; 14; 15)$$

$$\Delta I\mu_{min} = 0,25 \quad (15.)$$

При 6-ти фазной обмотке статора ВДПТ значения крайних точек относительной погрешности в свою очередь равны:

а) для первой группы факторов ( $\beta_0, x_{op}, i_f, i_d$ )

$$\Delta\mu_{max} = 3,45 \quad (1.)$$

$$\Delta I\mu_{max} = -0,76 \quad (1.)$$

$$\Delta\mu_{min} = 0,062 \quad (10.)$$

$$\Delta I\mu_{min} = -0,14 \quad (5.)$$

б) для второй группы факторов ( $x_{\sigma}$ ,  $x_{\sigma 1,2}$ ,  $x_{\sigma db}$ ,  $x_{ad}$ )

$$\Delta\mu_{max} = 0,73 \text{ (1.)}$$

$$\Delta\mu_{min} = 0,18 \text{ (14.)}$$

$$\Delta I\mu_{max} = -0,51 \text{ (1.)}$$

$$\Delta I\mu_{min} = -0,24 \text{ (11.)}$$

Знак (-) в относительной погрешности  $\Delta I\mu$  в ВДПТ6, наблюдаемый во всех 16 опытах по каждой группе факторов, указывает на то, что трапециидальная замена формы кривой тока сказывается на учете гармоник  $\mu = 12n \pm 1$ , ( $n = 1$ ) в сторону резервирования от сумм амплитуд гармоник реального фазного тока. Все данные, представленные в таблице (если умножить на 100), представляют собой выражения величин относительной погрешности в процентах. Определение ВВГ по трапеции, в ряде случаев, недопустимо, из-за чрезмерно большой величины относительной погрешности, которая может достигать 345% (см. таблица, опыт № 1, ВДПТ6; первая группа факторов -  $\beta_0$ ,  $x_{\sigma p}$ ,  $i_f$ ,  $i_d$ ), что в конечном итоге приводит к явному занижению реального уровня высших временных гармоник тока статора ВДПТ. Для возможности корректировки относительной погрешности расчёта уровня ВВГ по трапеции дальнейший этап обработки полученной информации, заключается в получении постоянных статистических коэффициентов уравнений описывающих функциональную зависимость  $y$  на всех принятых интервалах варьирования.

Входными параметрами для обработки программой SVD, являются матрица  $A$  и матрица - столбец исследуемой функции  $y$ , на место которой, в данном исследовании, подставлялись в порядке и соответственно табл. 1, функции величин относительной погрешности. По сути, в таблице имеем для каждого вида эксперимента свою матрицу - столбец  $y$  и статистические уравнения можно записать, например, как:

$$y(\Delta\mu) = K_0 \beta_{0*}^{k_1} \cdot x_{\sigma p*}^{k_2} \cdot i_{f*}^{k_3} \cdot i_{d*}^{k_4} \quad (3)$$

и, аналогично, для других вариантов сочетания параметров, указанных в таблице.

Таблица

Величина относительной погрешности при замене реальной формы кривой тока статора на трапецию.								
Фактор	Трехфазная обмотка - ВДЗ-				Шестифазная обмотка - ВД6-			
	$\beta_0, x_{\sigma p}, i_f, i_d$		$x_{\sigma}, x_{\sigma db}, x_{ad}$		$\beta_0, x_{\sigma p}, i_f, i_d$		$x_{\sigma}, x_{\sigma 1,2}, x_{\sigma db}, x_{ad}$	
№ опыта	$\Delta\mu$	$\Delta I\mu$	$\Delta\mu$	$\Delta I\mu$	$\Delta\mu$	$\Delta I\mu$	$\Delta\mu$	$\Delta I\mu$
1.	0.41	0.58	0.41	0.73	3.45	-0.76	0.73	-0.51
2.	0.57	0.86	0.21	0.34	2.41	-0.74	0.39	-0.41
3.	0.40	0.52	0.23	0.27	1.24	-0.65	0.33	-0.35
4.	0.32	0.37	0.29	0.50	1.24	-0.58	0.51	-0.46
5.	0.22	0.21	0.42	0.70	0.19	-0.14	0.51	-0.48
6.	0.19	0.32	0.27	0.40	0.16	-0.23	0.30	-0.32
7.	0.55	0.94	0.22	0.30	1.54	-0.63	0.30	-0.28
8.	0.15	0.25	0.32	0.49	0.22	-0.25	0.43	-0.41
9.	0.11	0.13	0.39	0.63	0.08	-0.15	0.46	-0.42
10.	0.08	0.13	0.28	0.43	0.06	-0.16	0.32	-0.28
11.	0.14	0.28	0.26	0.38	0.13	-0.24	0.30	-0.24
12.	0.14	0.26	0.30	0.47	0.17	-0.21	0.40	-0.37
13.	0.40	0.66	0.49	0.83	1.03	-0.60	0.60	-0.50
14.	0.74	1.19	0.21	0.32	1.05	-0.56	0.18	-0.47
15.	0.32	0.48	0.21	0.25	0.57	-0.50	0.32	-0.33
16.	0.25	0.27	0.29	0.48	0.39	-0.27	0.39	-0.40

На рис. 1 – 8 представлены графические зависимости величин относительной погрешности  $\Delta\mu$  и  $\Delta I\mu$ , построенные по уравнениям (4 ÷ 13). Здесь на одном графике представлены столько зависимостей исследуемых функций  $\Delta\mu$  и  $\Delta I\mu$ , сколько факторов. При построении любой зависимости от какого-либо фактора остальные принимают уровень средней точки варьирования и остаются *const* на всем интервале исследования.

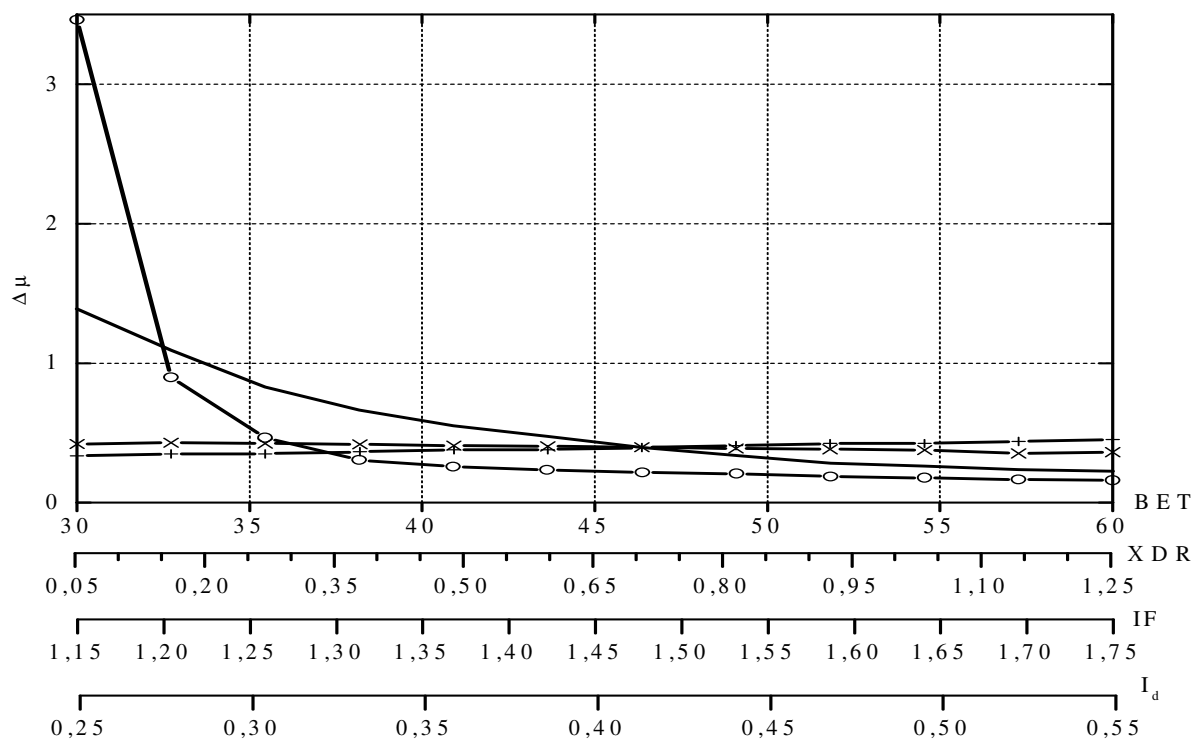


Рис. 1. Величина относительной погрешности  $\Delta\mu$  в ВДПТб в зависимости от факторов  $\beta_0, x_{ap}, i_f, I_d$  (---+--- - BET, ---0--- - XDR, ---x--- - IF, ---●--- -  $I_d$ )

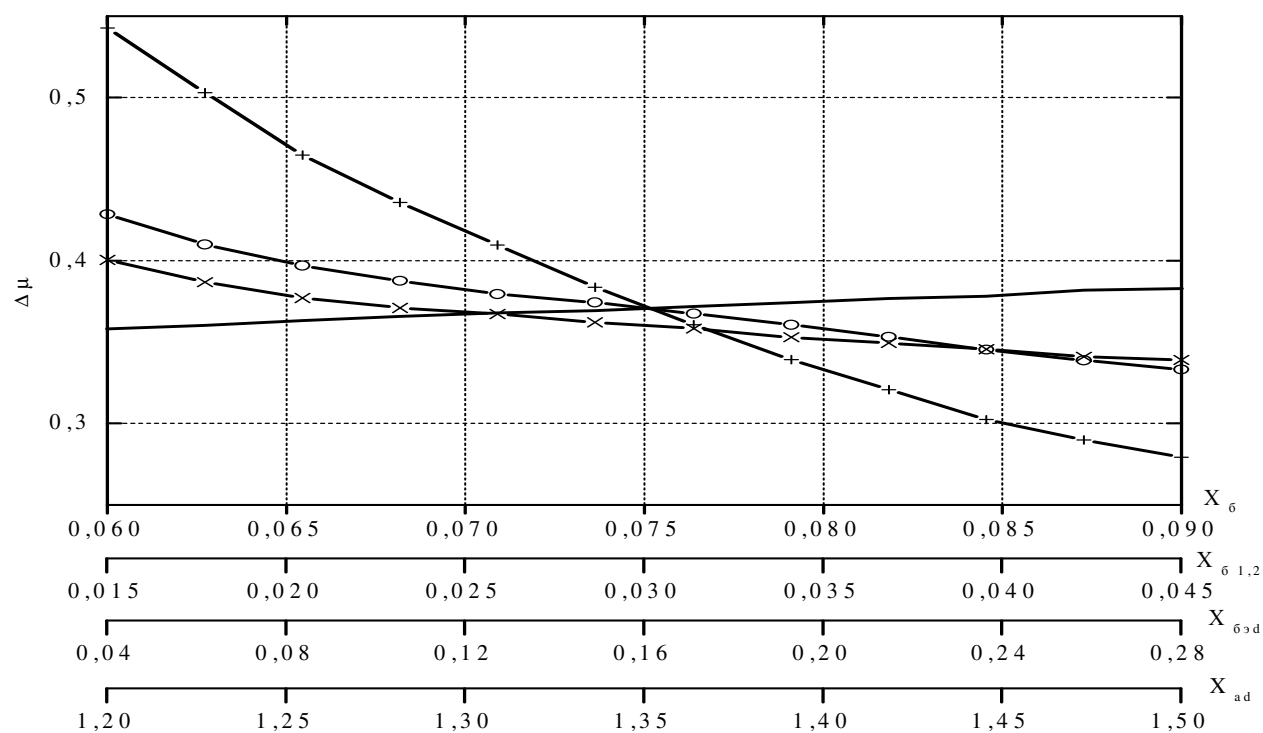


Рис. 2. Величина  $\Delta\mu$  в ВДПТб в зависимости от  $X_\sigma, X_{\sigma 1,2}, X_{\sigma \text{эд}}, X_{ad}$

(---+--- -  $X_\sigma$ ; ---0--- -  $X_{\sigma 1,2}$ ; ---x--- -  $X_{\sigma \text{эд}}$ ; ---●--- -  $X_{ad}$  )

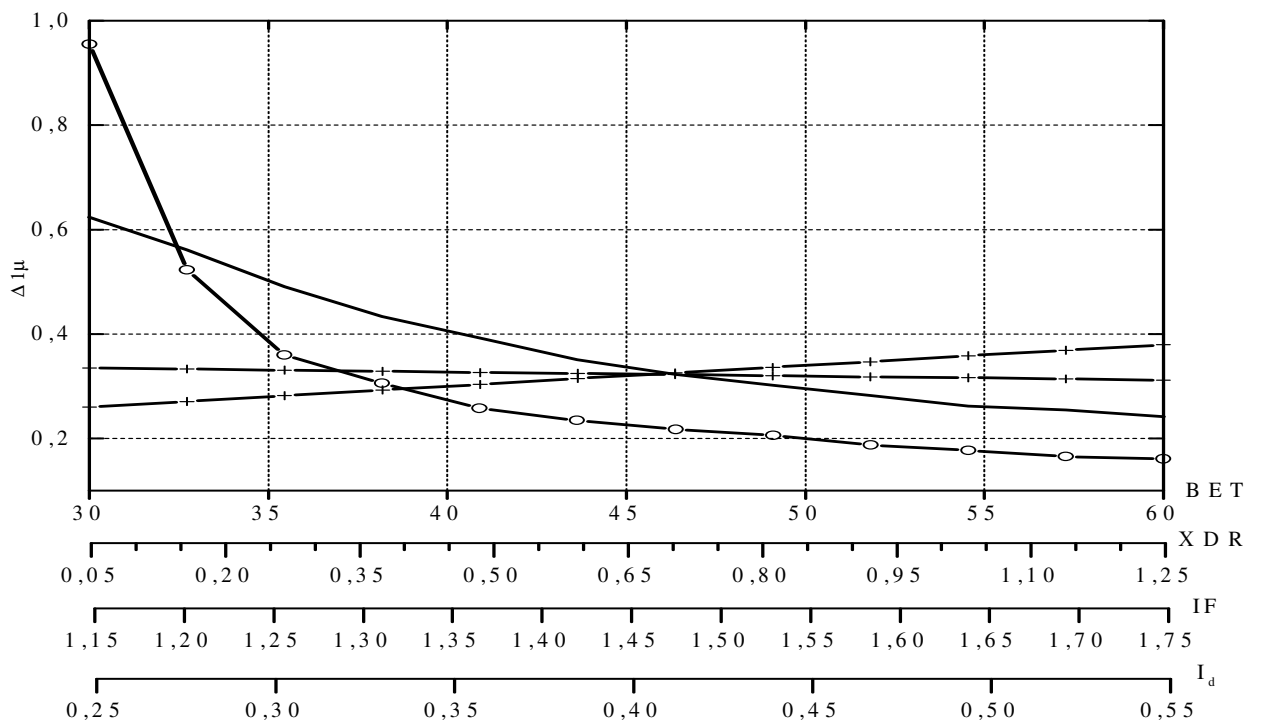


Рис. 3. Величина  $\Delta I\mu$  в ВДПТб в зависимости от факторов  $\beta_0, x_{др}, i_{ф}, I_d$   
 (---+--- BET; ---0--- XDR; ---x--- IF; ---●--- Id)

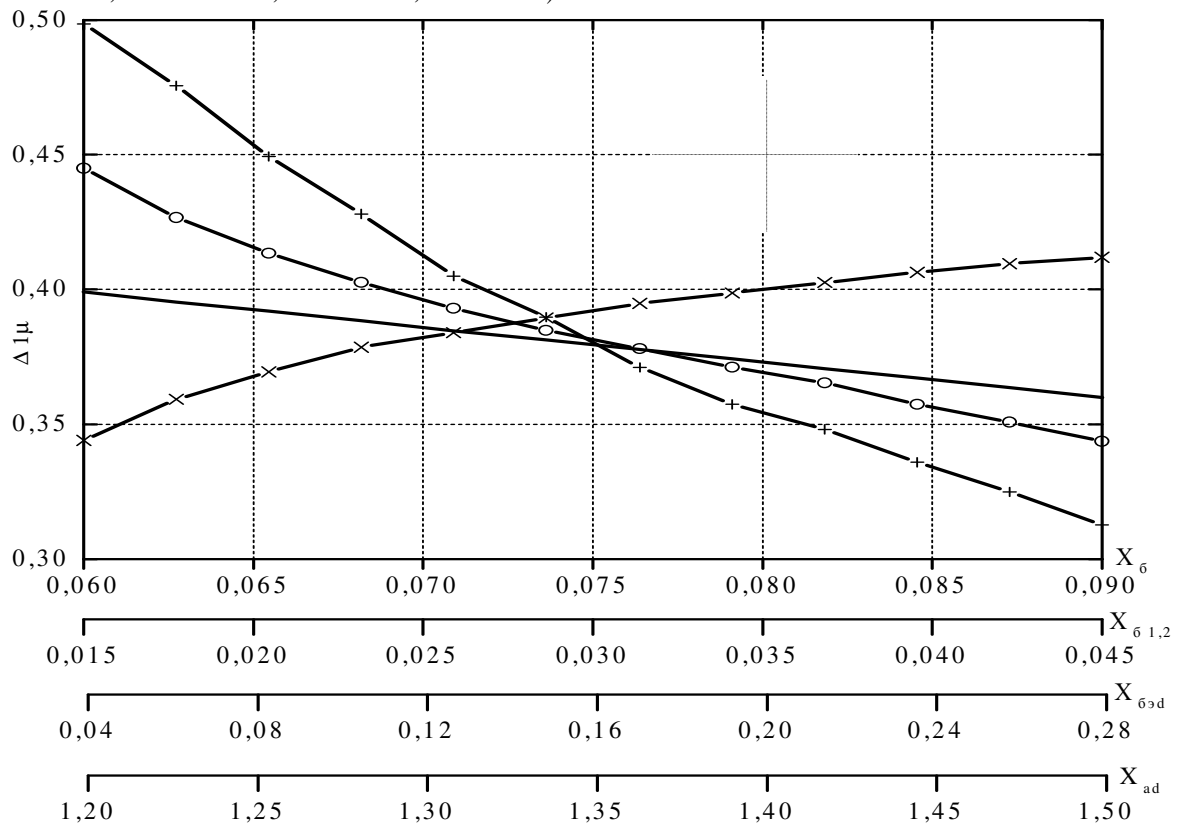


Рис. 4. Величина  $\Delta I\mu$  в ВДПТб в зависимости от  $X_{\sigma}, X_{\sigma эд}, X_{ад}$  (---○---  $x_{\sigma 1,2}$ ,  
 —  $x_{ад}$ , ---x---  $x_{\sigma эд}$ , ---+---  $x_{\sigma}$ )

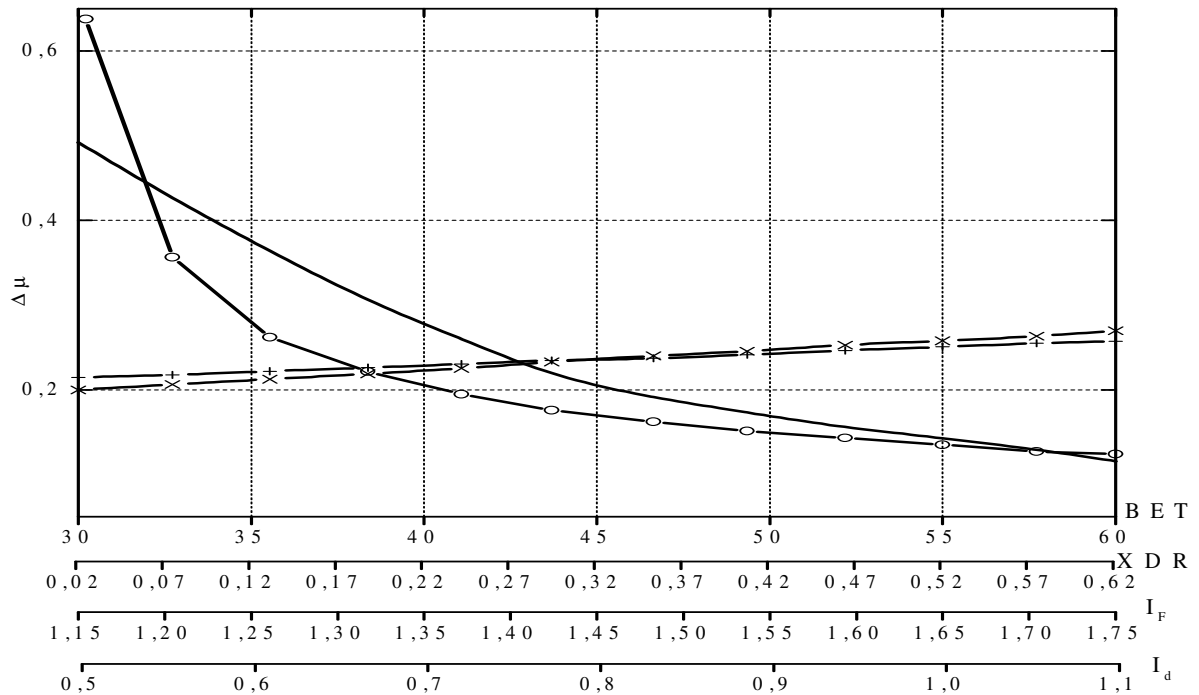


Рис. 5. Величина относительной погрешности  $\Delta\mu$  в ВДПТЗ в зависимости от факторов  $\beta_0, x_{app}, i_f, i_d$  (----+---- -  $BET$ ; ---0--- -  $XDR$ ; ----x--- -  $IF$ ; ---●--- -  $I_d$ )

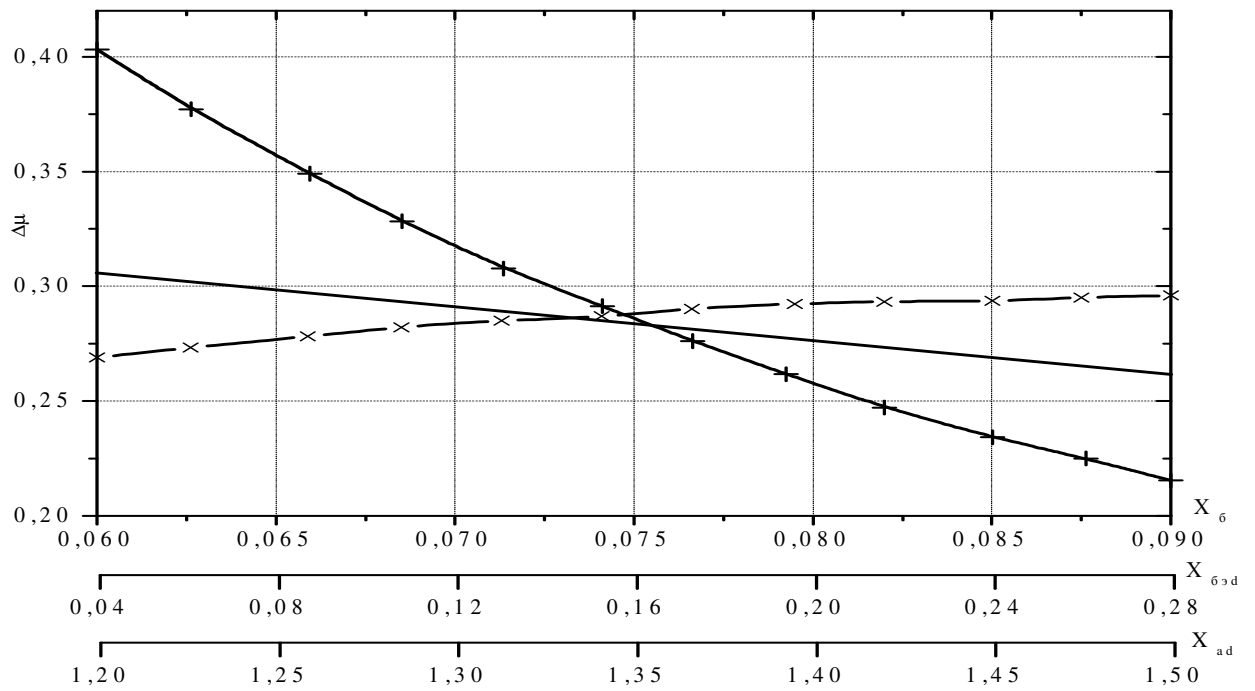


Рис. 6. Величина  $\Delta\mu$  в ВДПТЗ в зависимости от факторов  $x_\sigma, x_{\sigma ad}, x_{ad}$  (----+---- -  $x_\sigma$ ; ----x--- -  $x_{\sigma ad}$ ; ---●--- -  $x_{ad}$ )

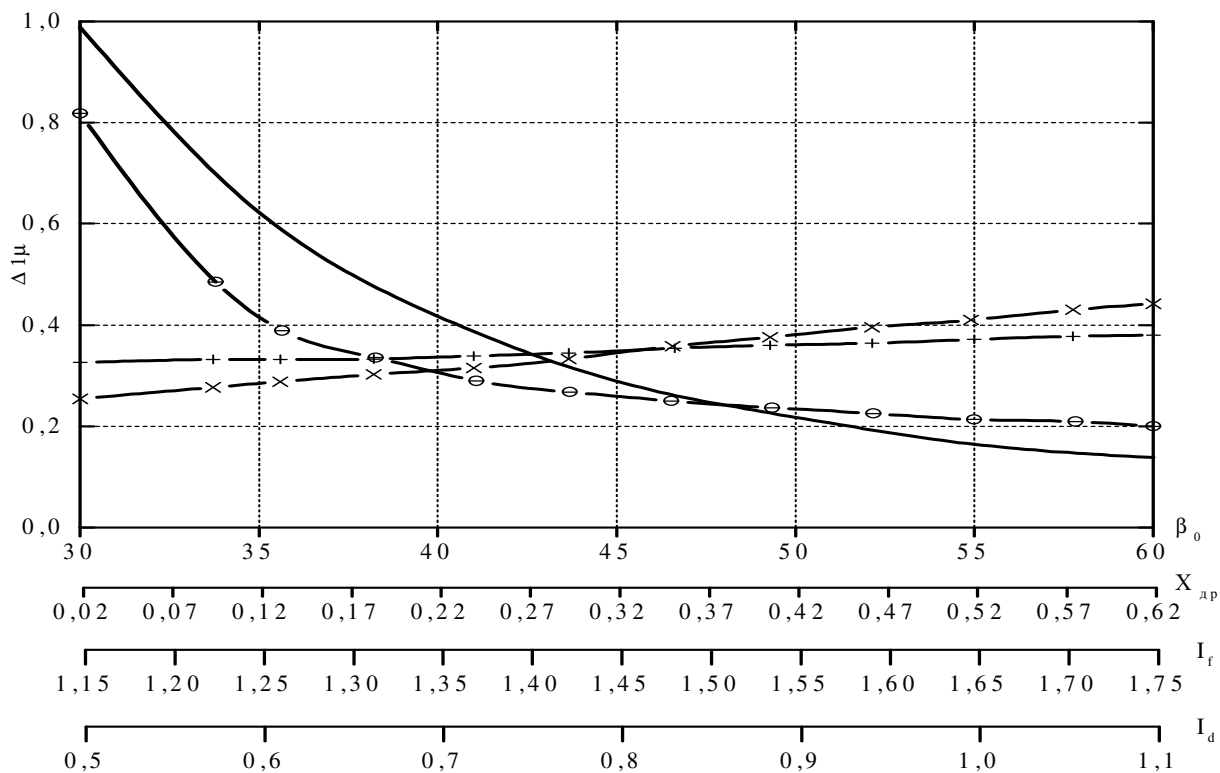


Рис. 7. Величина  $\Delta I\mu$  в ВДПТЗ в зависимости от факторов  $\beta_0, X_{ap}, I_f, I_d$   
 (---+--- - BET; ---o--- - XDR; ---x--- - IF; ---•--- - Id)

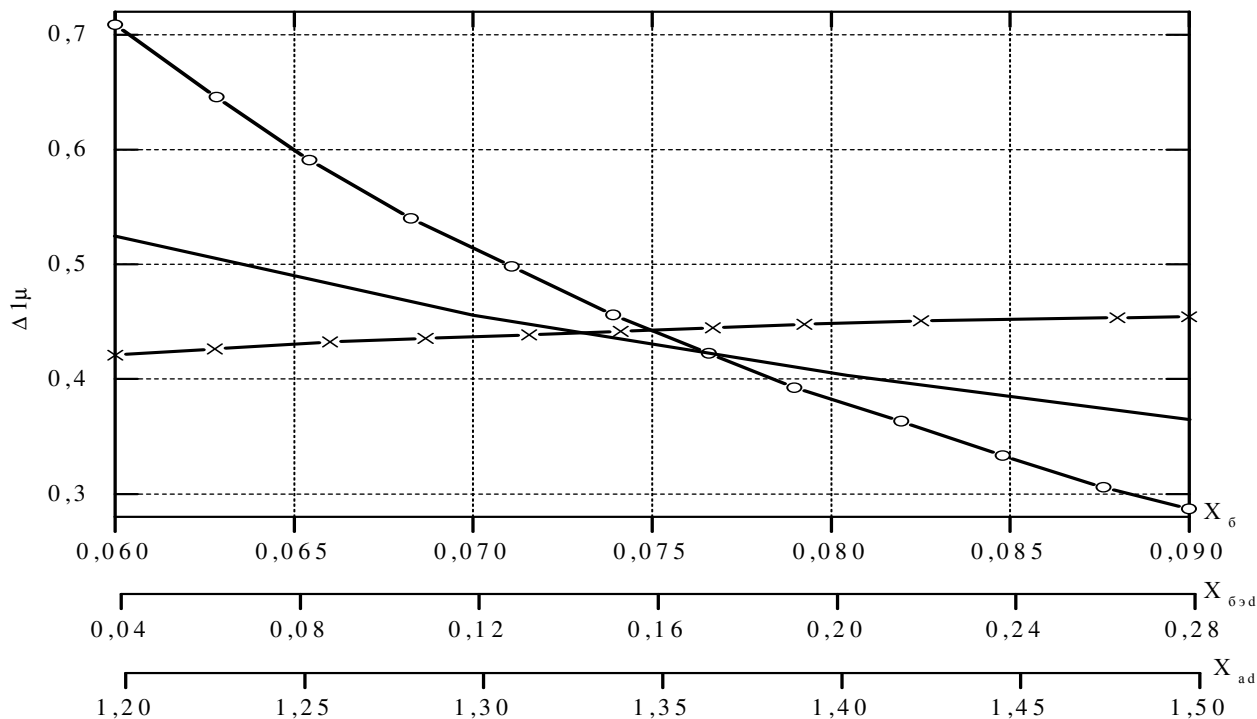


Рис. 8. Величина относительной погрешности  $\Delta I\mu$  в ВДПТЗ в зависимости от факторов  $X_\sigma, X_{\sigma\text{эд}}, X_{ad}$  (---  
 o---  $X_\sigma$ , ---x---  $X_{\sigma\text{эд}}$ , ---•---  $X_{ad}$  )

Кроме статистических моделей по определению величин относительной погрешности при замене реальной формы кривой тока статора ВДПТ на трапециидальную, представляет интерес также уровень самих высших временных гармоник. Наличие статистических моделей для их определения дает возможность прогнозировать с достаточной точностью величины амплитуд ВВГ без применения сложных математических методов.

Разработанные статистические модели для расчета формы кривой тока якоря отличаются простотой и инженерной применимостью на первом этапе создания ВДПТ

**Список источников информации:** 1. Волчуков Н.П. Цифровое моделирование высокоиспользуемых автономных систем электромеханического преобразования энергии: Дис.д-ра техн. наук: 05.09.01.-Х., 1996.-424с. 2 . Математическая модель электромагнитных процессов в вентильном двигателе Русаков А.М., Соломин А.Н., Окунева Н.А., Шатова И.В. Вестник Московского энергетического института. 2007. № 3. С. 33-40.



**Чернявская Маргарита Васильевна**, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера, диссертацию кандидата в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Соответственно 1963, 1974 году. Доцент кафедры «Информационных систем и технологий в городском хозяйстве» Харьковской национальной академии городского хозяйства с 2002 года. Интересы связаны с проблемами разработкой вентильных двигателей.



**Карпалюк Игорь Тимофеевич**, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера в Харьковской национальной академии городского хозяйства в 1993 году. Диссертацию кандидата по специальности светотехника та источники света в 1998 году. «Информационных систем и технологий в городском хозяйстве» Харьковской национальной академии городского хозяйства с 2002 года. Интересы связаны экономией электроэнергии, информационными технологиями и электрическими аппаратами на энергосберегающих технологиях.



**Глебова Марина Леонидовна**, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера в Харьковской национальной академии городского хозяйства в 1983 году. Диссертацию кандидата в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты в 2001 году. Доцент кафедры «Теоретической и общей электротехники» Харьковской национальной академии городского хозяйства. Интересы связаны с проблемами разработкой вентильных двигателей.

*Надійшла до редколегії 19.10.2012*

---

**Анотація** (на англійській мові).

**Chernyavsky M. V., Karpalyuk I. T., Glebova M. L.**

**ANALYSIS OF HIGH TIME HARMONIC CURRENTS DC BRUSHLESS MOTOR**

On statistical models the sizes of relative error are certain at substituting the real curve of phase current of stator of valve engine of direct-current by idealized, and also levels of ultraharmonics depending on the parameters of valve engine of direct-current..

**Index terms – synchronous machine, valve engine, the system of differential equations.**