

**Abstract**

S. A. Keshuov, L. D. Krotov, O. B. Ordatayev

(Kazakh research Institute of mechanization and electrify of agriculture)

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MUTUAL INDUCTANCE STATOR AND ROTOR WINDINGS OF GENERATORS ON THE BASIS OF ASYNCHRONOUS SLIP RING MOTOR**

**Keywords:** mutual inductance, experiment, generator, the asynchronous motor with slip-ring motors.  
The article describes a method to determine the mutual inductance between stator and rotor windings of the generator based on asynchronous slip ring motor is not available at the neutral point of the rotor phase.

УДК 621.313

C. A. КЕШУОВ, Л. Д. КРОТОВ, О. Б. ОРДАТАЕВ

(Казахский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства,  
Алматы, Казахстан)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ  
ИНДУКТИВНОСТИ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА ГЕНЕРАТОРА  
НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

**Аннотация.** В статье описан способ по определению взаимной индуктивности обмоток статора и ротора генератора на базе асинхронного двигателя с фазным ротором при не доступной нейтральной точки фаз ротора.

**Ключевые слова:** взаимная индуктивность, эксперимент, генератор, асинхронный двигатель с фазным ротором.

**Тірек сөздер:** өзара индуктивтілік, тәжірибе, генератор, фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыш.

**Keywords:** mutual inductance, experiment, generator, the asynchronous motor with slip-ring motors.

Для всех асинхронных с фазным ротором двигателей нейтральная точка фаз ротора недоступна, что делает невозможным прямое измерение напряжений фаз ротора. Это вызывает определенные проблемы при экспериментах по определению взаимных индуктивностей между фазными обмотками статора и ротора.

При экспериментах по определению взаимных индуктивностей между фазными обмотками статора и ротора можно использовать две схемы. По первой схеме (рисунок 1) напряжение подается на одну из фаз статора, и измеряются линейные напряжения фаз ротора.

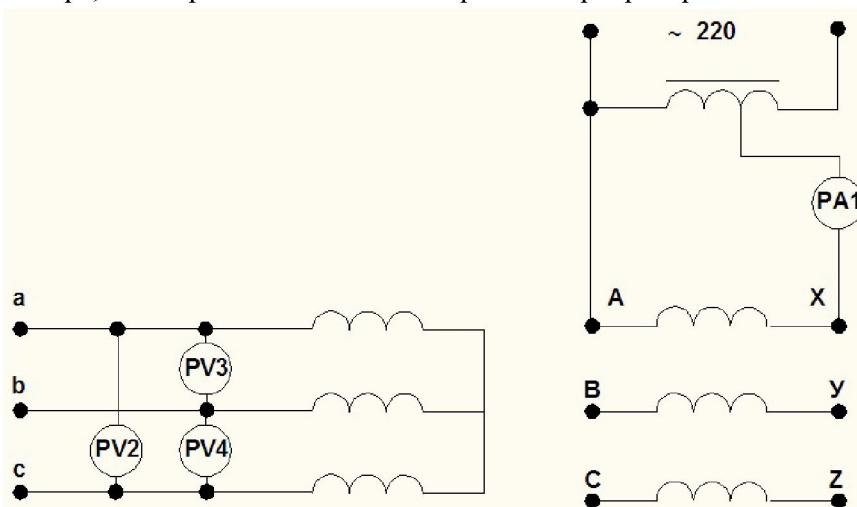


Рисунок 1 – Схема измерения взаимных индуктивностей между фазными обмотками статора и ротора

По показаниям приборов в этой схеме нельзя непосредственно определить сопротивление взаимной индуктивности между фазами обмоток статора и ротора. При этом ток фазы обмотки статора и линейные напряжения обмотки ротора зависят от потока взаимной индукции между ними, а также от положения в пространстве фаз статора и ротора.

Для определения этой связи, для АГ с числом пар полюсов  $p = 3$  приведем картину векторов магнитной индукции обмоток статора (рисунок 2). Синусоидальное напряжение подается в фазу A обмотки статора.

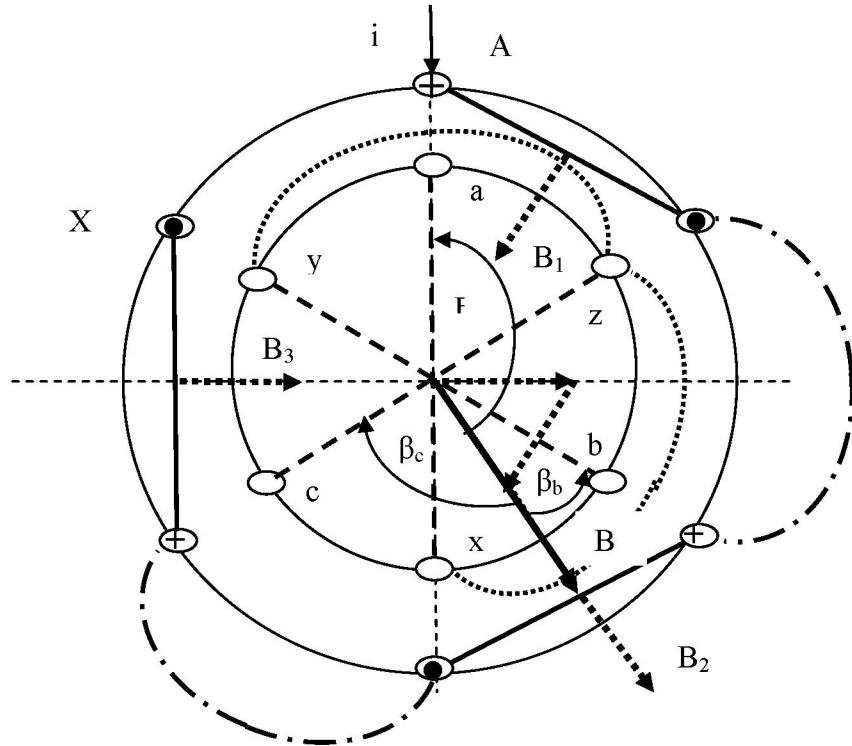


Рисунок 2 – Картина векторов магнитной индукции создаваемой токами фазы A обмотки статора

При этом в каждой из секций обмотки статора создается магнитный поток, вектора магнитной индукции которого  $\mathbf{B}_1$ ,  $\mathbf{B}_2$ ,  $\mathbf{B}_3$ , перпендикулярны плоскости каждой из секций обмотки статора, изменяются по синусоидальному закону и являются пульсирующими. Сердечники статора и ротора образуют магнитную цепь, по которой замыкаются силовые линии магнитного потока, созданного всеми секциями обмотки.

Вектор магнитной индукции этого потока равен сумме векторов создаваемых токами каждой секции обмотки.

$$\bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{B}}_q + \bar{\mathbf{B}}_2 + \bar{\mathbf{B}}_3$$

В нашем случае он имеет направление перпендикулярное плоскости второй секции обмотки статора. Максимальное его значение равно удвоенной величине максимальной индукции каждой из секций обмотки. Он сохраняет свое направление, величина его изменяется по синусоидальному закону, следовательно, он является пульсирующим вектором.

С учетом пространственного расположения векторов магнитной индукции, создаваемых токами каждой секции обмотки, они будут изменяться во времени по следующим законам:

$$B_1(t) := B_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad B_2(t) := B_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$B_3(t) := B_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad B(t) := 2 \cdot B_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{3}\right)$$

В программе MathCAD для выбранных нами параметров:

$$f := 50 \text{ Гц} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad B_m := 1 \text{ Тл} \quad T := \frac{1}{f}$$

построены временные диаграммы магнитной индукции для потоков секций обмотки и полного потока обмотки.

Временные диаграммы векторов (рисунок 3) соответствуют картине векторов магнитной индукции (рисунок 2). Амплитуда магнитной индукции поля обмотки в два раза больше амплитуды магнитной индукции секций обмотки и совпадает по фазе с индукцией второй секции обмотки.

$$t := 0, 0.0001.. 2T$$

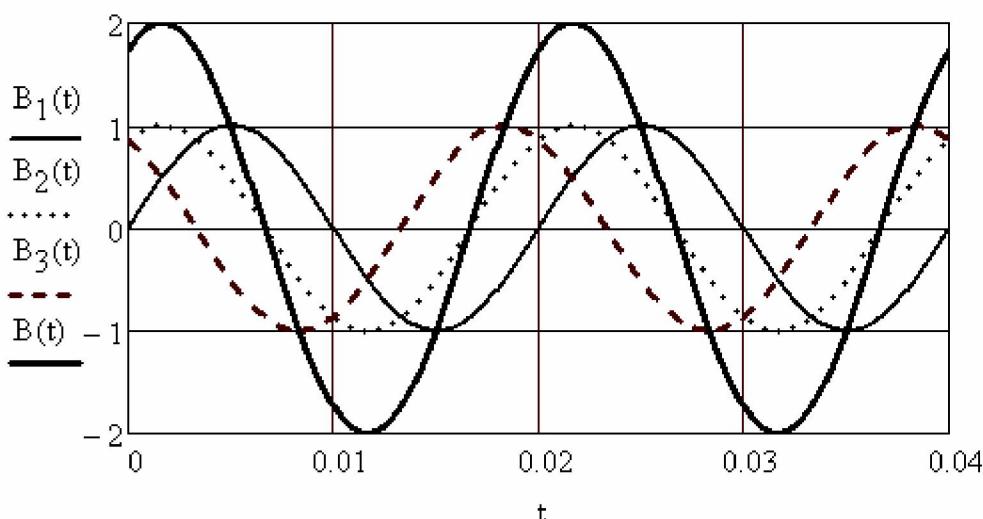


Рисунок 3 – Временные диаграммы векторов магнитной индукции, создаваемых токами фазы А обмотки статора

Для плоских катушек, какими являются обмотки ротора, ЭДС (ЭДС взаимной индукции), в соответствии закону Фарадея-Максвелла зависит только от нормальной составляющей вектора магнитной индукции поля, созданного обмоткой фазы статора. В свою очередь, нормальные составляющие этих векторов зависят от геометрического расположения в пространстве осей обмоток статора и ротора.

В соответствии с рисунком 2 ось катушки фазы **b** ротора совпадает с осью первой катушки фазы **A** статора. В этом случае величины углов, определяющих нормальные составляющие векторов магнитной индукции:

$$\beta_a := \frac{5 \cdot \pi}{6} \quad \beta_b := -\frac{\pi}{6} \quad \beta_c := -\frac{\pi}{2}$$

С учетом угла поворота ротора относительно обмоток статора **a**, нормальные составляющие векторов изменяются во времени по следующим законам:

$$B_a(t) := B(t) \cdot \sin(\pi - \beta_a + \alpha)$$

$$B_b(t) := B(t) \cdot \sin(\beta_b + \alpha) \quad B_c(t) := B(t) \cdot \sin(\beta_c + \alpha)$$

ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейные напряжения пропорциональны их первым производным. Для коэффициента пропорциональности  $A$ , ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейные напряжения:

$$\begin{aligned} e_a(t) &:= -A \cdot \left( \frac{d}{dt} B_a(t) \right) & e_b(t) &:= -A \cdot \left( \frac{d}{dt} B_b(t) \right) \\ e_c(t) &:= -A \cdot \left( \frac{d}{dt} B_c(t) \right) & u_4(t) &:= e_b(t) - e_c(t) \\ u_3(t) &:= e_a(t) - e_b(t) & u_2(t) &:= e_c(t) - e_a(t) \end{aligned}$$

Приняв значения коэффициента пропорциональности  $A = 0,051$ , в программе MathCAD построены временные диаграммы ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейных напряжений для разных значений угла поворота ротора  $\alpha$  (рисунок 4, а–г).

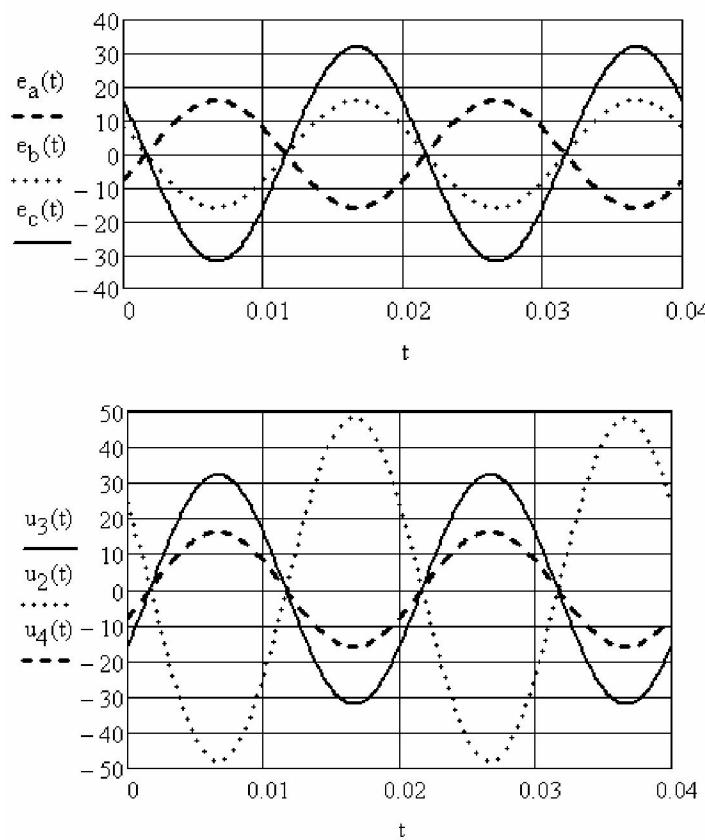


Рисунок 4, а – Временные диаграммы ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейных напряжений при  $\alpha = 0^\circ$

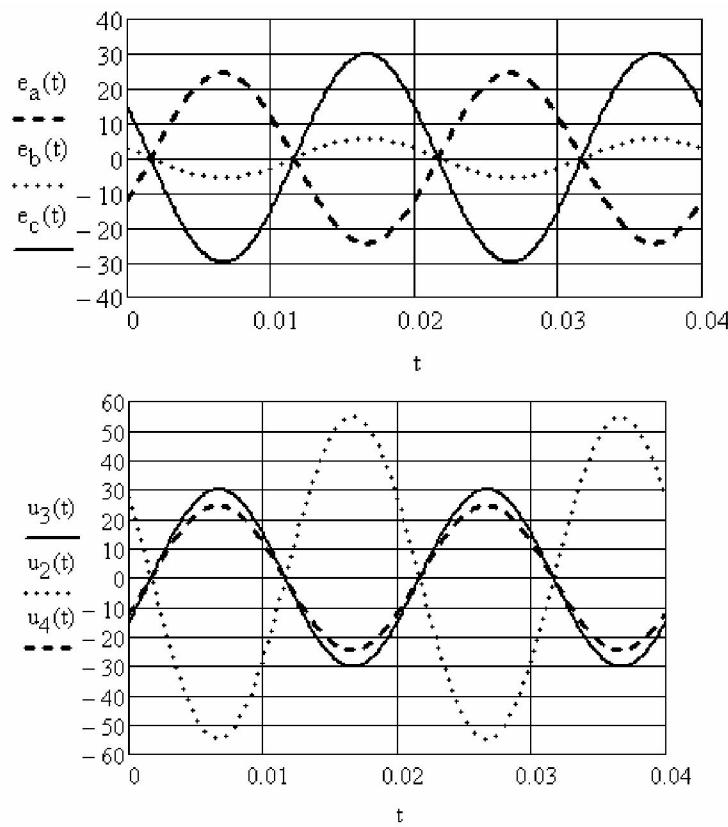


Рисунок 4, б – Временные диаграммы ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейных напряжений при  $\alpha = 10^\circ$

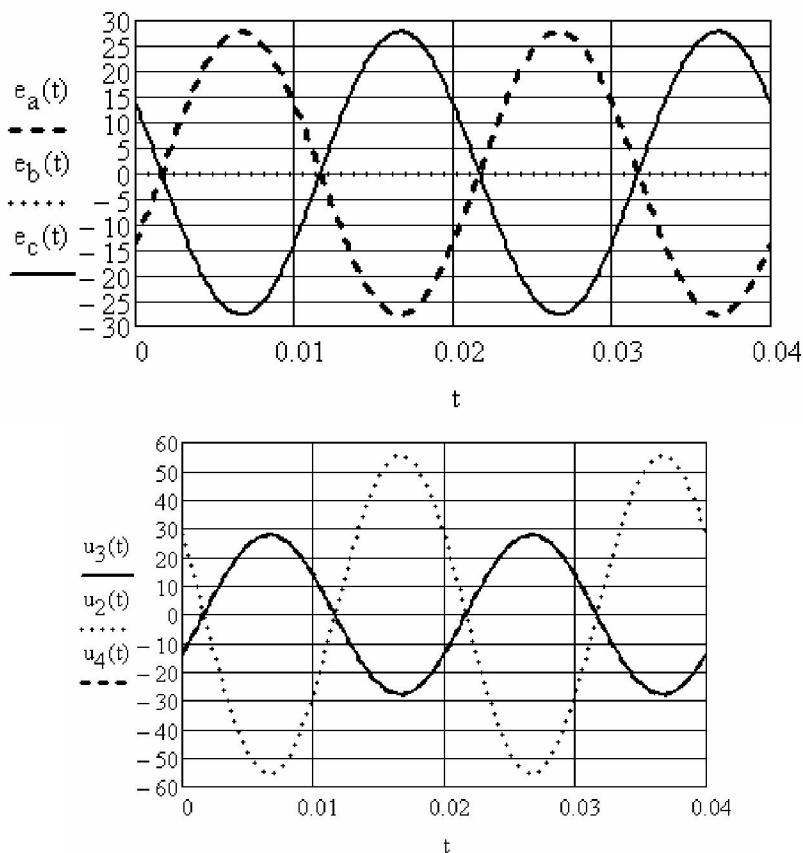


Рисунок 4, в – Временные диаграммы ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейных напряжений при  $\alpha = 30^\circ$

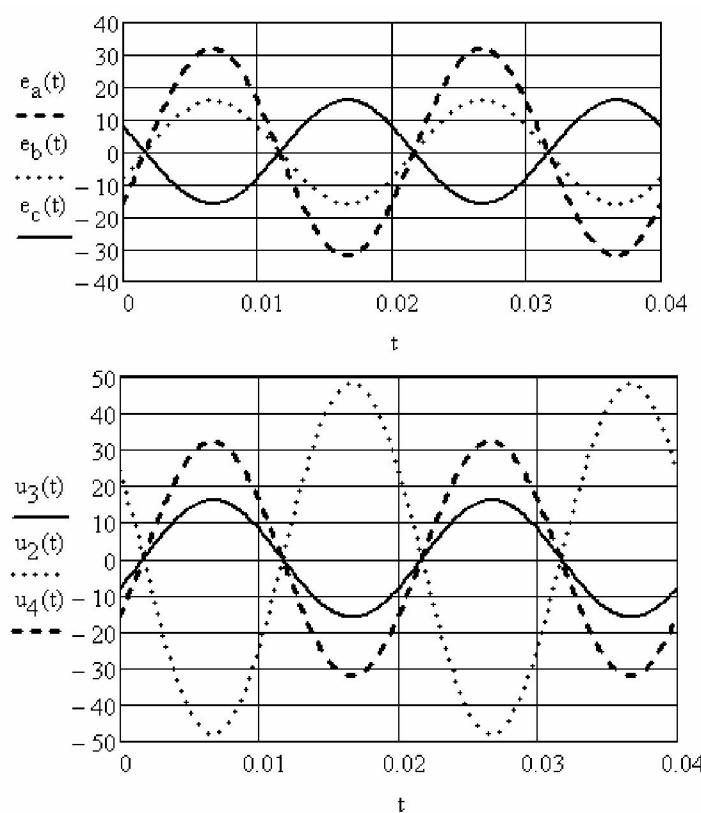


Рисунок 4, г – Временные диаграммы ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейных напряжений при  $\alpha = 60^\circ$

Анализ приведенных выше временных диаграмм ЭДС взаимоиндукции фаз обмоток ротора и его линейных напряжений показывает, что при любых положениях ротора, линейное напряжение взаимоиндукции  $u_3$  равно ЭДС взаимоиндукции фазы с ротора. Следовательно, замеряя действующие значение тока обмотки статора I и напряжения  $U_3$ , можно определить сопротивление взаимной индуктивности  $x_m$ , между фазами A статора и с ротора, а затем и взаимную индуктивность этих обмоток:

$$x_m = \frac{U_3}{I}, \quad M_{Ac} = \frac{x_m}{\omega}.$$

В силу симметрии трехфазного асинхронного двигателя максимальная взаимная индуктивность всех обмоток статора имеет одинаковые значения.

Проведены эксперименты по определению статора и взаимной индуктивности обмоток статора и ротора (схема рисунок 1), при разных геометрических положениях между осями обмоток статора и ротора. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Таблица

$\alpha$ , град	I, А	$U_3$ , В	$U_4$ , В	$U_2$ , В	$X_m$ , Ом	M, Гн
0	2	32	16	48,8	16	0,051
10	2	31,6	20	52,22	15,8	0,05
20	2	30	24	54,6	15	0,048
30	2	27,7	27,7	55,5	13,85	0,044
40	2	25	30	54,6	12,5	0,04
50	2	20	32	52,2	10	0,032
60	2	16	32	48,1	8	0,025
70	2	10,6	31,7	42,5	5,3	0,017
80	2	6	29,7	35,7	3	0,0055
90	2	0	27,8	27,7	0	0
120	2	16	16	0	8	0,025

Результаты эксперимента соответствуют выше изложенным теоретическим положениям.

