

УДК 621.313.333.045

*А.М. Якімец, Х.Г. Абдулкарім*

*Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка 1, м. Одеса 65044*

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РІЗНИЦЕВИХ ЕРС ДОВІЛЬНИХ ОБМОТОК

*Розглянуто можливість визначення розрахунку різницевиx ЕРС при будь-яких варіантах утворення паралельних гілок довільних багатозазних обмоток та можливість виникнення різницевиx ЕРС при традиційних умовах з урахуванням особливостей їх прояву в синхронних машинах з урахуванням додаткових гармонік магнітного поля*

**Ключові слова:** паралельна обмотка, різницеві ЕРС, зрівняльні струми

*А.М. Якімец, Х.Г. Абдулкарім*

*Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко 1, г. Одесса 65044*

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОСТНЫХ ЭДС ПРОИЗВОЛЬНЫХ ОБМОТОК

*Рассмотрена возможность определения расчета разностных ЭДС при любых вариантах образования параллельных ветвей произвольных многофазных обмоток и возможность возникновения разностных ЭДС при традиционных условиях с учетом особенностей их проявления в синхронных машинах с учетом добавочных гармоник магнитного поля.*

**Ключевые слова:** параллельная обмотка, разностные ЭДС, уравнительные токи.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.5/2014.28704>



*This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>*

## I. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в обмотках асинхронных двигателей серийного производства необходимо соблюдать условие симметрии, связывающее числа полюсов  $2p$  и параллельных ветвей  $a$ , соотношением:  $2p/a =$  целое число. Особенности исполнения некоторых электрических машин, например, в крупных синхронных и асинхронных машинах [1], а также в машинах специального назначения [2], приходится идти на нарушение данного условия. В этих ситуациях может возникнуть небаланс ЭДС параллельных ветвей и уравнительные токи, которые приводят к дополнительным добавочным потерям, появлению шумов и вибрации. Достаточно часто подобный небаланс возникает в процессе ремонта электрических машин [3].

С ростом величины тока в обмотках возникает необходимость прибегать к параллельному соединению катушечных групп. В этом случае любое неравенство результирующих ЭДС параллельных ветвей, как по величине, так и по фазе, опасно из-за возможности возникновения уравнительных токов.

Для устранения уравнительных токов, ЭДС параллельных ветвей обмотки должны быть одинаковы как по величине, так и по фазе. Для этого ветви должны состоять из одного и того же числа

катушек, эквивалентно распределенных по окружности машины. В идеальном случае лобовые части всех катушечных групп тоже должны быть одинаковыми, так как при невыполнении этого условия они будут обладать различными полными сопротивлениями. В случае двухслойных и однодвухслойных обмоток одинаковым должно быть и распределение активных сторон катушек каждой из параллельных ветвей по слоям [1].

Однако даже в самом идеальном случае, при полной идентичности всех параллельных ветвей, возможно возникновение уравнительных токов. Так, например, поле источника магнитного поля может быть не одинаковым на разных полюсных делениях. Причина этого заключается не столько в каких-либо различиях в самом индукторе (хотя и это не исключено), сколько в неравномерности зазора между индуктором и якорем. Даже при отличном расположении всех полюсов по отношению к оси вращения индуктора сама эта ось может быть смещена по отношению к оси якоря, так что зазор получается неравномерным естественно, что поле сильнее в местах с меньшим зазором, и наоборот. Поскольку в обмотках некоторых машин специального назначения избежать небаланса ЭДС параллельных ветвей не удается, то необходимо определять как величины разностных ЭДС, так и их фазы [1].

Задачей настоящей статьи является разработка универсального алгоритма расчета разностных ЭДС произвольных обмоток и его тестирование путем сопоставления полученных расчетных данных с результатами экспериментальных исследований.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ниже приводится алгоритм ADE расчета разностных ЭДС. Исходными данными для расчета по данному алгоритму являются:

- число  $Z$  пазов сердечника, в котором уложена исследуемая обмотка;
- рабочее число пар полюсов  $p$ ;
- число рассматриваемых параллельных ветвей  $a$ ;
- числа  $N_j$  АКС в каждой из параллельных ветвей;
- знакопеременные массивы номеров пазов  $P_{Ni}$ , в которых уложены АКС каждой  $i$ -ой параллельной ветви  $P_{Ni} = \{n_{1i}, n_{2i}, n_{3i}, \dots, n_{ij}, \dots, n_{Ni}\}$ ;
- массивы  $W_{Nj}$  относительных чисел проводников (витков), соответствующих каждой АКС в  $i$ -ой параллельной ветви.

При необходимости указываются также шаг обмотки по пазам  $u$  и величина скоса  $b_{ck}$ .

**ADE 1.** Расчет угла  $\alpha_Z$  минимального сдвига в магнитном поле  $\alpha_Z = 2\pi / Z$ .

**ADE 2.** Формирование массивов  $A_{Nik}$  угловых координат АКС в каждой из  $a$  параллельных ветвей по гармоникам  $k$ -го порядка в диапазоне изменения последних от 1 до  $Z/2$  по выражению  $A_{Nik} = \{\alpha_{1ik}, \alpha_{2ik}, \dots, \alpha_{ijk}, \dots, \alpha_{Nik}\}$ ,

где

$$\alpha_{ijk} = \begin{cases} kn_{ij} \cdot \alpha_Z, & \text{если } n_{ij} > 0 \\ kn_{ij} \cdot abc(\alpha_Z) + \pi, & \text{если } n_{ij} < 0 \end{cases}$$

**ADE 3.** Определение абсолютных величин векторов  $E_{Pik}$  ЭДС каждой из  $a$  параллельных ветвей по гармоникам  $k$ -го порядка в диапазоне изменения последних от 1 до  $Z/2$ .

$$E_{Pij} = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{N_i} w_i^* \sin[k\alpha_{ik}] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^{N_i} w_i^* \cos[k\alpha_{ik}] \right\}^2}$$

**ADE 4.** Расчет обмоточных коэффициентов  $k_{Wik}$  параллельных ветвей электрической машины:

- коэффициент распределения  $i$ -ой ветви  $k_{Dik}$  по гармонике порядка  $k$

$$k_{Dij} = \frac{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{N_i} w_i^* \sin[k\alpha_{ik}] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^{N_i} w_i^* \cos[k\alpha_{ik}] \right\}^2}}{N_i}$$

– обмоточный коэффициент

$$k_{Wik} = k_{Dik} k_{Yk} k_{CKk}$$

где  $k_{Yk}$  – коэффициент укорочения,  $k_{CKk}$  – коэффициент скоса по гармонике порядка  $k$ .

**ADE 5.** Определение угловых координат  $A_{i(j)k}$  векторов результирующих ЭДС  $\dot{V}_{i(j)k}$  каждой из  $a$  параллельных ветвей

$$A_{P_{i(j)k}} = \arctg \frac{\sum_{i=1}^{N_j} w_i^* \sin[k\alpha_{i(j)}]}{\sum_{i=1}^{N_j} w_i^* \cos[k\alpha_{i(j)k}]}$$

**ADE 6.** Определение величины вектора ЭДС фазы  $V_{Php}$ , по рабочей гармонике  $k=p$ , равного среднему значению результирующих векторов ЭДС ветвей

$$E_{Php} = \frac{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^a E_{Pip} \sin(A_{Pip}) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^a E_{Pip} \cos(A_{Pip}) \right]^2}}{a}$$

**ADE 7.** Определение величин векторов  $\Delta E_{Pijk}$  разностных ЭДС, равных относительной геометрической разности векторов ЭДС для всех возможных парных сочетаний ( $i$  и  $j$ ) параллельных ветвей по гармоникам  $k$ -го порядка

$$\Delta E_{Pip} = \sqrt{\left[ E_{Pijk} \sin(A_{Pijk}) - E_{Pijk} \sin(A_{Pijk}) \right]^2 + \left[ E_{Pijk} \cos(A_{Pijk}) - E_{Pijk} \cos(A_{Pijk}) \right]^2}$$

**ADE 8.** Определение относительных значений векторов  $\Delta E^*_{Pijk}$  разностных ЭДС

$$\Delta E^*_{Pijk} = \frac{\Delta E_{Pijk}}{E_{Php}}$$

Реальное значение разностной ЭДС  $\Delta E$  параллельных ветвей зависит не только от коэффициента неуравновешенности  $f_{ijk}$ , но и от условий создания генерирующего магнитного поля в том или ином типе электрических машин.

В синхронных машинах все пространственные гармоники поля возбуждения вращаются с одинаковой скоростью. Но число полюсов  $k$ -ой гармоники в  $k$  раз больше, чем у первой, поэтому  $f_k = f \cdot k$ .

При известном соотношении гармоник индукции  $B_k / B_p$  относительное значение разностной ЭДС  $E^*_{Cjk}$  по  $k$ -ой гармонике можно определить по выражению

$$\begin{aligned}\Delta E^*_{Pijk} &= \frac{E_{Pijk} f_{ijk}}{E_{Php}} = \\ &= \frac{2\sqrt{2} f w k_{Pw} k_{CKk} B_k l_{\delta} \tau}{2\sqrt{2} f w k_{Pw} k_{CKp} B_p l_{\delta} \tau} f_{ijk} = \\ &= \frac{k_{Pw} k_{CKk} B_k}{k_{Pw} k_{CKp} B_p} f_{ijk}.\end{aligned}$$

Если рассматриваются параллельные ветви в неявнополусном синхронном генераторе, то можно полагать, что в первом приближении отношение индукций  $B_k / B_p$  можно заменить отношением МДС  $F_v / F_p$ , поэтому

$$\Delta E^*_{Pijk} = \frac{k_{Pw} k_{CKk} k_{OBw} P}{k_{Pw} k_{CKp} k_{OBp} k} f_{ijk}.$$

В асинхронных машинах все пространственные гармоники вращаются со скоростью в  $k$  раз меньшей, чем у первой. Поэтому  $f_k = f$

$$\begin{aligned}\Delta E^*_{APK} &= \frac{E_{PK} f_k}{E_{Php}} = \\ &= \frac{1}{k} \frac{2\sqrt{2} f w k_{w} k_{CKk} l_{\delta} \tau B_k}{2\sqrt{2} f w k_{w} k_{CKp} l_{\delta} \tau B_p} f_k = \\ &= \frac{P}{k^2} \frac{k_{w} k_{CKk}}{k_{w} k_{CKp}} f_k.\end{aligned}$$

Рассмотрим применение предложенного алгоритма на примере расчета разностных ЭДС одной из схем обмоток, представленных в [1, рис.3.25,б].

Исходные данные:  $Z=36$ ,  $p=3$ ,  $a=2$ ,  $N_j=6$ ,  $N_1=N_2=6$ ,  $P_{N1}=\{1, 25, 26, -20, -31, -32\}$ ,  $P_{N2}=\{2, 13, 14, -7, -8, -19\}$ . Обмотка однослойная, равновитковая ( $w=const$ ) и скос на сердечниках отсутствует.

Предложенный алгоритм разностных ЭДС был реализован в среде EXEL. Полученные результаты сведены в табл.1.

Полученные результаты расчета показывают что, при  $a=3$  в состав каждой параллельной ветви входят две группы секций; если расположить их рядом, как в схеме *a*, то обмотка будет отфильтровывать гармонические четных порядков, но в случае неправильной сборки машин между параллельными ветвями неизбежно возникнут уравнильные токи. Если же расположить эти группы по концам диаметра, как в схеме *б*, то в обмотке, не теряющей фильтрующей способности, практически не будет уравнильных токов. При  $a=2$  в состав каждой ветви входит по три групп; полностью подавить гармонические четных порядков уже нельзя, но, соединяя последовательно группы, лежащие рядом, как в схеме *в*, можно

уменьшить их содержание втрое, зато уравнильные токи между такими ветвями при неправильной сборке неизбежны. Эти токи будут практически отсутствовать при последовательном соединении групп через одну, как в схеме *з*, но гармонические четных порядков будут представлены полностью.

Для подтверждения адекватности предложенной математической модели выполним сравнение полученных расчетных данных с результатами эксперимента.

**Таблица 1** – Гармонические анализы вариантов схем *a*, *б*, *в* и *г*.

$v$	$k_{Rv}$	$E$	$\Delta E^*_v$	$\Delta \varphi_l$
схема <i>a</i>				
1	0,211	0,845	1,730	120,0
2	0,663	2,654	2,718	120,0
3	0,966	3,864	0,000	0,000
схема <i>б</i>				
1	0,423	1,690	3,464	120,0
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,966	3,864	0,000	0,000
схема <i>в</i>				
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,511	3,064	1,586	180,0
3	0,966	5,796	0,000	0,000
схема <i>г</i>				
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,966	5,796	0,000	0,000

Где:  $v$  – порядок гармоники;  $k_{Rv}$  – коэффициент распределения;  $E$  – фазная ЭДС;  $\Delta E^*_v$  – относительная ЭДС;  $\Delta \varphi_l$  – угловой сдвиг.

На кафедре электрических машин изготовлен экспериментальный образец синхронного генератора. В 36 пазах статора синхронного генератора уложена шестиполусная равнокатушечная обмотка, а его сердечник ротора состоит из 30 пазов, в них уложена специальная совмещённая обмотка ротора, зажимы которой выведены на контактные кольца. Указанная обмотка позволяет генерировать 3 варианта поля возбуждения: двухполусное и 2 варианта поля с числом полюсов  $2p=6$ . Кроме этого в роторе лежит отдельная четырёхполусная обмотка возбуждения. Проведение опытов было с изменением тока возбуждения.

Из таблицы 2, видно что эксперимент подтвердил данные которые мы ожидали получить после расчета схем в EXEL, данные получены в ходе эксперимента были достаточно точны, поскольку относительная погрешность не превысила 2%.

**Таблица 2** – Сравнительный анализ полученных расчетных данных с результатами эксперимента.

Число полюсов	$\Delta E^*_{\text{эк}}$	$\Delta E^*_{\text{расч}}$	Относительная погрешность
Схема а			
2p=2	1.742	1.73	0.006
2p=4	1.730	1.73	0.000
2p=6	0.000	0.00	0.000
Схема б			
2p=2	1.710	1.73	-0.011
2p=4	0.000	0.00	0.000
2p=6	0.000	0.00	0.000
Схема в			
2p=2	0.000	0.00	0.000
2p=4	2.032	2.00	0.016
2p=6	0.000	0.00	0.000
Схема г			
2p=2	0.000	0.00	0.000
2p=4	0.000	0.00	0.000
2p=6	0.000	0.00	0.000

Где:  $\Delta E^*_{\text{эк}}$ —относительная экспериментальная разностных ЭДС;  $\Delta E^*_{\text{расч}}$ — относительная расчетная разностных ЭДС.

*A.M. Yakimets, H.G. Abdulkareem*

*Odessa national polytechnic university, Shevchenko avenue, 1, Odessa, 65044*

## METHODS OF DETERMINING THE DIFFERENCE EMF ARBITRARY WINDINGS

*The possibility of difference in EMF and traditional conditions and possibility of determining the difference calculating power at any variants education parallel branches arbitrary multi-phase windings and the possibility of a difference in traditional EMF conditions taking into account the characteristics of their manifestations in synchronous machines considering additional harmonics of the magnetic field.*

**Keywords:** *Parallel winding, difference emf, equalizing currents.*

## REFERENCES

- Zherva G.K.** Obmotki elektresheskyekh mashen peremyenovno toka [ Windings of electrical machines AC]. L.: Energoatomezdat, 1989.—400p.
- Degtev V.G.** Metodika semetrerovonya sovshonek obmotok [Balancing technique

## III. ВЫВОДЫ

1. Указанный алгоритм достаточно просто реализуется на любом из алгоритмических языков и может быть эффективно использован для оперативного контроля при любых вариантах образования параллельных ветвей произвольных многофазных обмоток.

2. Существует возможность возникновения разностных ЭДС, при разных полюсностях между индуктором и якорем, с учетом особенностей их проявления в синхронных машинах с учетом добавочных гармоник магнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

- Жерве, Г. К.** Обмотки электрических машин переменного тока [Текст] / Г.К.Жерве//Л.: Энергоатомиздат, 1989.—400 с.
- Дегтев, В.Г.** Методика симметрирования совмещённых обмоток [Текст] / В.Г. Дегтев, Н.И. Билоненко, В.П. Сверщевский // Известия ВУЗ “Электромеханика”, №9.—1987.— С.59-64.
- Лущик, В.Д.** Типові помилки при виготовленні обмоток двообмоткових асинхронних машин [Текст] / Лущик .В.Д.,Береда І.М.// Електротехніка і електромеханіка. — 2012. - №4. — С.41-42.

combined windings]// Izvestya VUZ “Elektrotekneka”, №9.—1987.— P.59-64.

- Lushchek V.D.** Tepove pomelki pri vegotovyanya obmotok dvoobmotkovi asinkronik mashen [Common mistakes when making double-winding induction machine windings]//Elektrotekneka i Elektromekaneke.—2012.—№4.— P.41-42.

Отримана в редакції 22.07.2014, прийнята до друку 29.07.2014