

## ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ И УСЛОВИЯ СОВМЕСТИМОСТИ ДВУХ РАЗНОПОЛЮСНЫХ МАШИН В ОДНОМ МАГНИТОПРОВОДЕ

В. С. НОВОКШЕНОВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

В последние годы при проектировании известных и создании новых преобразователей частоты [1, 2, 3] и каскадных асинхронных двигателей все более широко используется принцип совмещения двух разнополюсных машин в одном магнитопроводе.

Однако достаточно полно вопросы теории совмещенных машин в технической литературе не освещены.

В данной работе на основе полученных выражений обмоточного коэффициента совмещенных машин дается анализ условий совместимости двух разнополюсных электрических машин в одном магнитопроводе.

### Обмоточный коэффициент совмещенных машин

Обычно обмоточный коэффициент обмоток переменного тока для гармонических поля этих обмоток выражается в виде произведения коэффициентов распределения секций и укорочения шага обмотки.

При подсчете э. д. с., индуцируемой в одной обмотке полем другой, имеющей иное число полюсов, такое выражение обмоточного коэффициента становится недостаточным, так как в этом случае э. д. с. отдельных катушек обычно не совпадает по фазе, то есть при последовательном соединении таких катушек индуцируемые в них э. д. с. складываются геометрически, что может быть учтено введением в обмоточный коэффициент третьего множителя — коэффициента распределения катушек обмотки, под которым понимается отношение геометрической суммы э. д. с. катушек к их алгебраической сумме.

Следовательно, обмоточный коэффициент обмотки, имеющей число пар полюсов  $P_0$  для поля  $\Phi_n$ , имеющего число пар полюсов  $P_n$ , может быть выражен следующим образом:

$$K_{\text{won}} = K_{\text{yon}} \cdot K_{\text{pon}} \cdot K_{\text{эон}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{yon}}$ ,  $K_{\text{pon}}$ ,  $K_{\text{эон}}$  — коэффициенты укорочения шага распределения секций, распределения катушек обмотки для поля  $\Phi_n$ .

Коэффициенты укорочения шага и распределения секций выражаются, как известно, формулами

$$k_{\text{зон}} = \sin \frac{\beta \pi \nu}{2}, \quad k_{\text{рон}} = \frac{\sin \frac{q \gamma \nu}{2}}{q \sin \frac{\gamma \nu}{2}} \quad (2)$$

где  $\nu$  — отношение числа пар полюсов поля  $\Phi_n$  к числу пар полюсов обмотки;

$\gamma$  — угол сдвига между двумя соседними пазами в электрических градусах обмотки.

Коэффициент распределения катушек обмотки рассмотрим подробнее; при этом сначала рассмотрим коэффициенты распределения характерных групп катушек, а затем дадим общее выражение коэффициента распределения катушек обмоток переменного тока.

На рис. 1 приведена группа  $q'_k$  катушек, сдвинутых друг относительно друга на угол  $\gamma'_k$  в электрических градусах обмотки или на  $\gamma'_k \nu$  электрических градусов поля. Для простоты изображения число секций в катушке принято равным единице. Катушки соединены последовательно так, что начало каждой последующей катушки соеди-

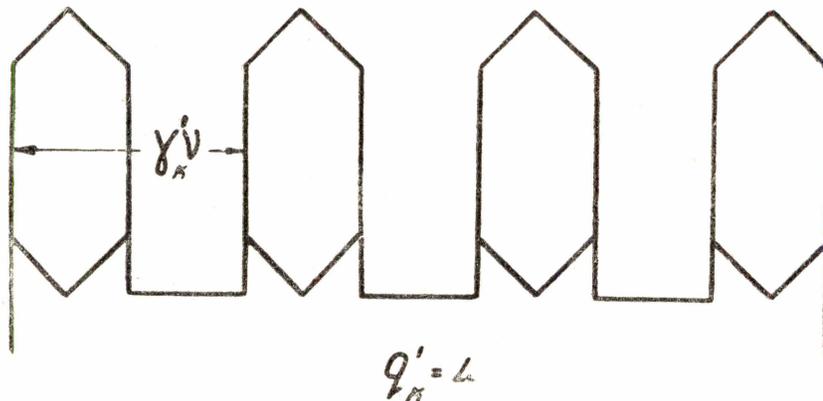


Рис. 1.

няется с началом предыдущей. Создаваемые этими катушками магнитные потоки в любой момент времени имеют одну одинаковую для всех катушек полярность, поэтому мы их называем катушками одной полярности.

Э. д. с., индуцируемые в катушках полем  $\Phi_n$ , могут быть представлены в виде системы  $q'_k$  векторов, сдвинутых один относительно другого на угол  $\gamma'_k \nu$ ; такая система векторов аналогична системе  $q$  векторов э. д. с. секций, сдвинутых одна относительно другой на угол  $\gamma \nu$ .

Поэтому очевидно, что формула коэффициента распределения катушек будет аналогична формуле коэффициента распределения секций, а именно

$$k'_{\text{зон}} = \frac{\sin \frac{q'_k \gamma'_k \nu}{2}}{q'_k \sin \frac{\gamma'_k \nu}{2}}, \quad (3)$$

в чем нетрудно убедиться, повторив геометрические построения и математические операции, которые приводятся при выводе известной формулы коэффициента распределения секций.

На рис. 2, а приведены две катушки разной полярности. Вторая катушка сдвинута относительно первой на  $\gamma_k''$  электрических градусов поля  $\Phi_n$  и передвинута.

Согласно приведенной на рис. 2, б векторной диаграмме индуктируемая в паре катушек э. д. с. равна

$$\bar{E}_{12} = \bar{E}_1 + (-\bar{E}_2).$$

Коэффициент распределения такой пары катушек

$$k_{\xi_{\text{оп}}}'' = \frac{E_{12}}{2E_1} = \frac{AB}{2AC} = \sin \frac{\gamma_k''}{2}. \quad (4)$$

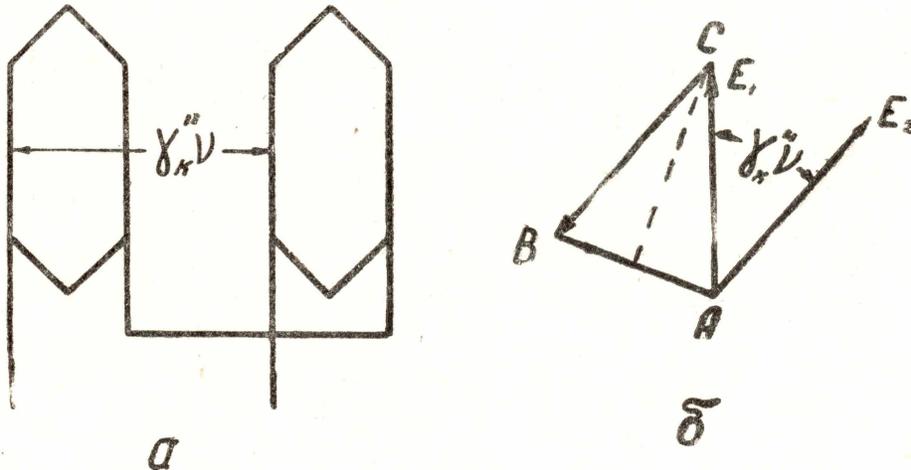


Рис. 2.

Группу катушек чередующейся полярности (рис. 3) можно рассматривать состоящей из  $q_k'$  пар катушек разной полярности, где  $q_k'$  — число последовательно соединенных катушек одной полярности. Любые две соседние катушки одной полярности сдвинуты между собой на  $\gamma_k'$  электрических градусов поля.

Коэффициент распределения пар катушек может быть представлен формулой (3), а коэффициент распределения каждой пары катушек разной полярности формулой (4). Тогда коэффициент распределения катушек чередующейся полярности получим как произведение коэффициентов  $k_{\xi_{\text{оп}}}'$  и  $k_{\xi_{\text{оп}}}''$ .

$$k_{\xi_{\text{оп}}} = k_{\xi_{\text{оп}}}'' \cdot k_{\xi_{\text{оп}}}'' = \frac{\sin \frac{q_k' \gamma_k' \gamma_k''}{2}}{q_k' \sin \frac{\gamma_k' \gamma_k''}{2}} \sin \frac{\gamma_k''}{2}. \quad (5)$$

Каждая фаза обмотки переменного тока (или каждая параллельная ветвь фазы, если число параллельных ветвей  $a > 1$ ) состоит из группы последовательно соединенных катушек одной или чередующейся полярности. Поэтому выражение (5) следует рассматривать как формулу коэффициента распределения катушек обмоток переменного тока; при этом в случае последовательного соединения только катушек одной полярности второй сомножитель в формуле (5) следует принимать равным единице.

Для каждого конкретного типа обмотки коэффициент распределения катушек может быть выражен в функции числа пар полюсов обмотки  $p_0$ , числа пар полюсов поля  $p_n$  и числа параллельных ветвей обмотки  $a$ , для чего необходимо в формулу (5) подставить соответствующие этим обмоткам значения  $\gamma'_k, \gamma''_k, q_k$ .

С точки зрения расчета коэффициента  $k_{\varepsilon_{оп}}$  для различных типов обмоток переменного тока их удобно подразделить на обмотки с числом катушек в фазе  $q_k = p_0$  и обмотки с числом катушек в фазе  $q_k = 2p_0$ .

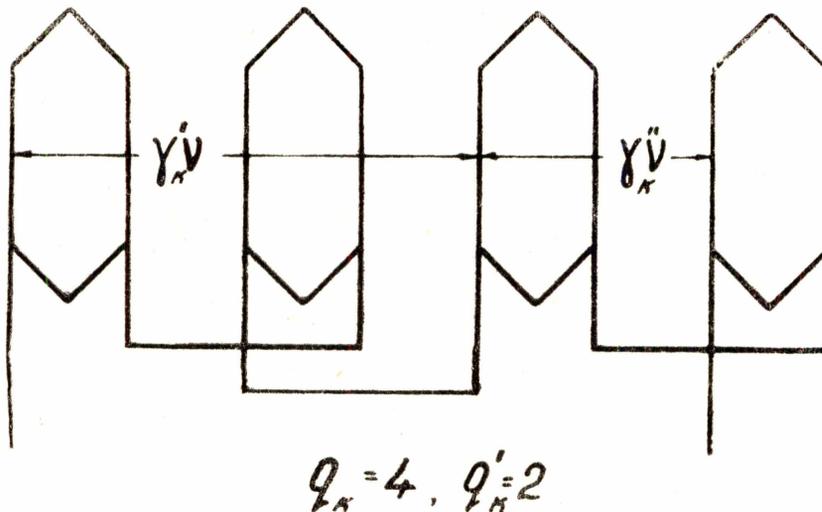


Рис. 3.

Каждый из этих типов обмоток в свою очередь делится на  
а) обмотки с сосредоточенным расположением катушек в каждой параллельной ветви, когда ряд рядом лежащих катушек данной фазы образуют одну параллельную ветвь, следующий ряд катушек другую и т. д.;

б) обмотки с распределенным расположением катушек в каждой параллельной ветви, когда катушки каждой параллельной ветви равномерно распределены по всей окружности статора (ротора). Например, при  $a = 2$  все нечетные катушки фазы принадлежат одной параллельной ветви, все четные — другой.

Коэффициенты распределения катушек указанных типов обмоток, выраженные через  $p_0, p_n$  и  $a$ , приведены в табл. 1.

#### Анализ условий совместимости двух электрических машин в одном магнитопроводе

Известно [4], что для совмещения двух электрических машин в одном магнитопроводе необходимо выполнить два условия:

1. Наложение магнитных полей совмещенных машин не должно вызывать появления сил односторонних магнитных притяжений и вибраций, что согласно Р. Рихтеру, выполняется, если соблюдается неравенство

$$p_1 \pm p_2 \neq \pm 1, \quad (6)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — числа пар полюсов совмещенных машин.

2. Между обмотками совмещенных машин должна отсутствовать трансформаторная связь. Анализ выполнимости последнего условия проводился рядом авторов [4, 5]. Однако при этом использовался

Таблица 1

Тип обмотки	Число катушек в фазе	Расположение катушек в параллельной ветви	Значения $q_k$ $\gamma_k$ $\bar{\gamma}_k$	Коэффициент распределения катушек	Условия, при которых $\kappa_{\xi_{оп}} = 0$	Условия, при которых $\kappa_{\eta_{оп}} = 0$	Условия, при которых $\kappa_{\rho_{оп}} = 0$
Однослойная	$p_0$	сосредоточенное	$\frac{p_0}{a}$ , $2\pi$ , —	$\kappa_{\xi_{оп}} = \frac{a \sin \frac{p_{II} \pi}{a}}{p_0 \sin \nu a \pi}$	$\nu \neq$ целому числу, если $\frac{p_{II}}{a} =$ $=$ целому числу	$\beta \nu =$ четному числу	$\nu = 2mN$ где $m$ — число фаз, $N$ — любое целое число
Однослойная	$p_0$	распределенное	$\frac{p_0}{a}$ , $2\pi a$ , —	$\kappa_{\xi_{оп}} = \frac{a \sin p_{II} \pi}{p_0 \sin \nu a \pi}$	$\nu a \neq$ целому числу		
Однослойная Двухслойная	$2 p_0$	сосредоточенное	$\frac{p_0}{a}$ , $2\pi$ , $\pi$	$\kappa_{\xi_{оп}} = \frac{a \sin \frac{p_{II} \pi}{a}}{p_0 \sin \nu \pi} \sin \frac{\nu \pi}{2}$	$\nu =$ четному числу, а также при $\nu \neq$ целому числу, если $\frac{p_{II}}{a} =$ $=$ целому числу		
Однослойная $a =$ нечетному числу Двухслойная $a =$ нечетному числу	$2 p_0$	распределенное	$\frac{p_0}{a}$ , $2\pi a$ , $\pi a$	$\kappa_{\xi_{оп}} = \frac{a \sin p_{II} \pi}{p_0 \sin \nu a \pi} \sin \frac{\nu a \pi}{2}$	$\nu a \neq$ целому числу, а также при $\nu a =$ четному числу		
Однослойная $a =$ четному числу Двухслойная $a =$ четному числу	$2 p_0$	распределенное	$\frac{2 p_0}{a}$ , $\pi a$ —	$\kappa_{\xi_{оп}} = \frac{a \sin p_{II} \pi}{2 p_0 \sin \frac{\nu a \pi}{2}}$	$\nu a \neq$ четному числу		

трудоемкий и неудобный метод комплексного аналогического или графического сложения векторов э. д. с. секционных сторон обмотки.

Анализ условия отсутствия трансформаторной связи между двумя разнополюсными обмотками можно провести кратко и просто, если воспользоваться приведенными выше формулами обмоточных коэффициентов. Действительно, условие отсутствия трансформаторной связи между двумя обмотками (обозначим их индексами 1 и 2) выполняется, если

$$\begin{aligned}K_{\omega 12} &= K_{y12} \cdot K_{p12} \cdot K_{\xi 12} = 0, \\K_{\omega 21} &= K_{y21} \cdot K_{p21} \cdot K_{\xi 21} = 0,\end{aligned}\quad (7)$$

где  $K_{\omega 12}$ ,  $K_{y12}$ ,  $K_{p12}$ ,  $K_{\xi 12}$  — обмоточный коэффициент и коэффициенты укорочения шага, распределения секций, распределения катушек обмотки 1 для поля обмотки 2;  $K_{\omega 21}$ ,  $K_{y21}$ ,  $K_{p21}$ ,  $K_{\xi 21}$  — обмоточный коэффициент и коэффициент укорочения шага, распределения секций, распределения катушек обмотки 2 для поля обмотки 1.

Формулы (6) и (7) представляют собой обобщенную математическую запись условий совместимости двух электрических машин в одном магнитопроводе.

Для того, чтобы обмоточные коэффициенты (7) равнялись нулю, необходимо и достаточно, чтобы в каждом из них был равен нулю либо обмоточный коэффициент укорочения, либо обмоточный коэффициент распределения секций, либо обмоточный коэффициент распределения катушек.

Значения  $\beta$ ,  $p_0$ ,  $p_n$ ,  $a$ , при которых обмоточные коэффициенты распределения катушек, распределения секций и укорочения шага обмотки равны нулю, приведены в табл. 1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, 1961.
2. В. С. Новокшенов. Некоторые вопросы теории асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Известия ТПИ, т. 94, 1958.
3. В. М. Павлинин, Н. С. Сиунов. Свойства и эффективность одномашинного преобразователя частоты. Известия высших учебных заведений, Электромеханика, № 1, 1960.
4. А. Д. Имас. Разработка и исследование высокочастотных электросверл. Отчет по теме № 16, ДОНУГИ, Донецк, 1948.
5. Б. М. Милич. О схемах обмоток совмещенных машин. Информационно-технический сборник ЦБТИ, НИИЭ, № 11, 1959.

Поступила в редакцию  
в июне 1962 г.