

УДК 621.313

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЯВНОПОЛЮСНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

КАЗАКОВ Ю.Б., д-р техн. наук

Рассмотрено влияние способа распределения параллельной и последовательной обмоток возбуждения по пазам статора на характеристики и коммутацию неявнополюсных двигателей постоянного тока смешанного возбуждения. Показана существенность такого влияния по сравнению с явнополюсными машинами. Приведены результаты расчетов параметров машин при разных способах распределения обмоток.

*Ключевые слова:* коэффициент полюсного перекрытия, магнитный поток, индукция, зона коммутации.

## THE INFLUENCE OF THE FIELD COIL DISTRIBUTION METHOD ON CHARACTERISTICS OF NONSALIENT POLE D.C. MOTOR OF MIXED EXCITATION

KAZAKOV Yu.B., Ph.D.

The article concerns the influence of parallel and series field coil distribution method through stator slots on characteristics and commutation of nonsalient pole d.c. motors of mixed excitation. It shows the importance of such influence in comparison with the salient pole machines. It contains the results machine operation factors calculation with different methods of coils distribution.

*Key words:* pole eclipse coefficient, magnetic flow, induction, commutation zone.

Возрастание мощности неявнополюсных машин постоянного тока (НПМПТ) сопровождается повышением степени распределения обмоток возбуждения (ОВ). В НПМПТ смешанного возбуждения параллельная и последовательная ОВ, имеющие свои токи, числа витков и провода, могут иметь разновитковые катушки, разные их числа и шаги, быть распределены по разным пазам (рис. 1). В целом такое распределение позволяет использовать меньше катушек, чем при одинаковом (пропорциональном) распределении витков обеих ОВ по пазам. Иногда одинаковые распределения витков параллельной и последовательной ОВ просто не могут быть выполнены. НПМПТ имеют ряд преимуществ перед явнополюсными машинами (ЯМПТ) с сосредоточенными обмотками возбуждения на явновыраженных полюсах, в частности они имеют меньшие массогабаритные показатели. Но у них наблюдаются более напряженная коммутация, меньшая динамическая устойчивость работы [1–3, 5].

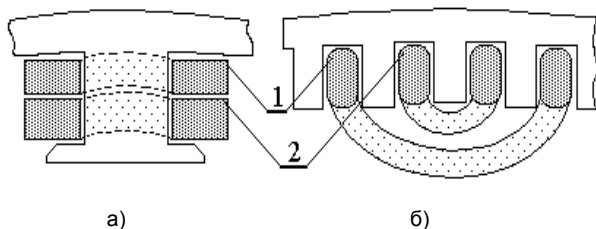


Рис. 1. Размещение ОВ в МПТ: а – в явнополюсной МПТ; б – неявнополюсной МПТ; 1 – параллельная ОВ; 2 – последовательная ОВ

Одним из основных коэффициентов в МПТ является коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha$ . Его увеличение приводит к повышению доли потока ОВ, проникающего в зону коммутации  $\Phi_{взк}$ , и ухудшению коммутации. В явнополюсных МПТ коэффициенты полюсного перекрытия параллельной  $\alpha_{ПАР}$  и последовательной  $\alpha_{ПОС}$  ОВ заданы формой полюса и рав-

ны между собой во всех режимах. В НПМПТ при разных распределениях параллельной и последовательной ОВ  $\alpha_{ПАР}$  и  $\alpha_{ПОС}$  могут различаться (рис. 2).

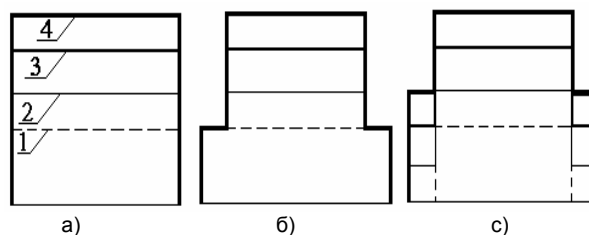


Рис. 2. Формы распределения намагничивающих сил обмоток параллельного и последовательного возбуждения на полюсном делении для разных их распределений в зависимости от тока якоря: а –  $\alpha_{ПАР} = \alpha_{ПОС}$ ; б –  $\alpha_{ПАР} > \alpha_{ПОС}$ ; в –  $\alpha_{ПАР} < \alpha_{ПОС}$ ; 1 –  $I_a = 0$ ; 2 –  $I_a = 0,5 I_H$ ; 3 –  $I_a = I_H$ ; 4 –  $I_a = 1,5 I_H$

При нескольких распределенных обмотках  $\alpha$  необходимо рассчитывать по магнитному полю и/или на основании анализа распределения МДС обмоток. Если ОВ главных полюсов (параллельная и последовательная) НПМПТ выполнены в виде концентрических катушек, в том числе, с разным распределением по пазам, то их  $\alpha$  могут оказаться разными, в отличие от ЯМПТ. Так, для распределенных на статоре М обмоток  $\alpha$  для  $i$ -й обмотки рассчитывается по формуле [4]

$$\alpha_i = \frac{\sum_{n=1}^{K_i} (Y_{ni} w_{ni})}{\left( \tau \sum_{n=1}^{K_i} w_{ni} \right)},$$

где  $Y_{ni}$  –  $n$ -й шаг из  $K_i$  шагов  $K_i$  концентрических катушек  $i$ -й обмотки;  $w_{ni}$  – число витков  $n$ -й катушки  $i$ -й обмотки,  $\tau$  – полюсное деление.

Результирующий коэффициент полюсного перекрытия определяется как

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^M \left[ J_i \sum_{n=1}^{K_i} (Y_{ni} W_{ni}) \right]}{\left( \tau \sum_{i=1}^M \left( J_i \sum_{n=1}^{K_i} W_{ni} \right) \right)},$$

где  $J_i$  – ток  $i$ -й обмотки;  $W_i = \sum_{n=1}^{K_i} W_{ni}$  – число ее витков на полюс.

Если доля МДС  $i$ -й обмотки в результирующей МДС составляет

$$\beta_i = J_i W_i / \left( \sum_{i=1}^M (J_i W_i) \right), \text{ то } \alpha = \sum_{i=1}^M (\beta_i \alpha_i).$$

При наличии только параллельной и последовательной ОВ

$$\begin{aligned} \alpha_d &= \beta_{\text{ПАР}} \alpha_{\text{ПАР}} + \beta_{\text{ПОС}} \alpha_{\text{ПОС}} = \\ &= \beta_{\text{ПАР}} \alpha_{\text{ПАР}} + (1 - \beta_{\text{ПАР}}) \alpha_{\text{ПОС}}. \end{aligned}$$

Очевидно, что требуемый коэффициент  $\alpha_d$  можно обеспечить разными способами распределения обмотк: изменяя шаги, число катушек и перераспределяя число витков в них. Для смешанного возбуждения, распределяя параллельную и последовательную ОВ соответствующим образом, можно обеспечить требуемое изменение  $\alpha_d$  и формы магнитного поля с ростом нагрузки (рис. 3). Коэффициент  $\alpha_d$  изменяется от значения  $\alpha_{d\text{ПАР}}$  при холостом ходе до значения  $\alpha_{d\text{Н}}$  при номинальном токе якоря. Поэтому изменение жесткости скоростной характеристики машины возможно и за счет изменения распределения витков параллельной и последовательной ОВ, а не только путем изменения соотношения их МДС.

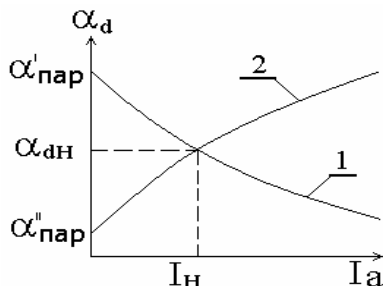


Рис. 3. Изменение результирующего коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha_d$  с ростом нагрузки: 1 –  $\alpha'_{\text{ПАР}} > \alpha_{\text{ПОС}}$ ; 2 –  $\alpha''_{\text{ПАР}} < \alpha_{\text{ПОС}}$

В НПМПТ смешанного возбуждения с согласным включением параллельной и последовательной ОВ с ростом нагрузки растет магнитный поток возбуждения, происходит насыщение зубцов статора и ротора по оси полюса, уплощение кривой распределения индукции в зазоре и некоторое увеличение  $\alpha_d$ . Для учета влияния насыщения используется поправочный коэффициент  $\xi$  в функции насыщения зубцового слоя. Поток рассеяния ОВ и коэффициент рассеяния неявно выраженных главных полюсов с ростом насыщения также увеличиваются.

Одновременно с ростом тока якоря растет  $\Phi_{\text{ВЗК}}$  (рис. 4). При  $\alpha_{\text{ПОС}} > \alpha_{\text{ПАР}}$  рост  $\Phi_{\text{ВЗК}}$  происходит с большей интенсивностью. Так как обычно зона безыскровой работы МПТ с ростом тока якоря сужается, то для сохранения удовлетворительной коммутации желательно, чтобы доля  $\Phi_{\text{ВЗК}}$  в магнитном потоке ОВ снижалась.

Для этого параллельная и последовательная ОВ должны выбираться так, чтобы  $\alpha_{\text{ПАР}} > \alpha_{\text{ПОС}}$ . То-

гда коэффициент  $\alpha_d$  с ростом тока якоря будет снижаться, сужение зоны безыскровой работы с ростом нагрузки будет меньше (рис. 5), а коммутация при перегрузках и в пусковых режимах для машин с настраиваемой коммутацией и отсутствием влияния потока главных полюсов будет лучше. Учитывая, что двигатели часто работают в неустановившихся режимах с большим числом включений и реверсов, применение распределения параллельной и последовательной ОВ так, чтобы  $\alpha_{\text{ПАР}} > \alpha_{\text{ПОС}}$ , обеспечивает более высокие динамические коммутационные свойства двигателя.

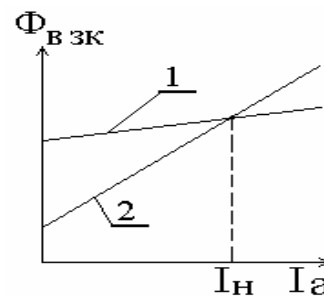


Рис. 4. Изменение потока  $\Phi_{\text{ВЗК}}$  с ростом нагрузки: 1 –  $\alpha_{\text{ПАР}} > \alpha_{\text{ПОС}}$ ; 2 –  $\alpha_{\text{ПАР}} < \alpha_{\text{ПОС}}$

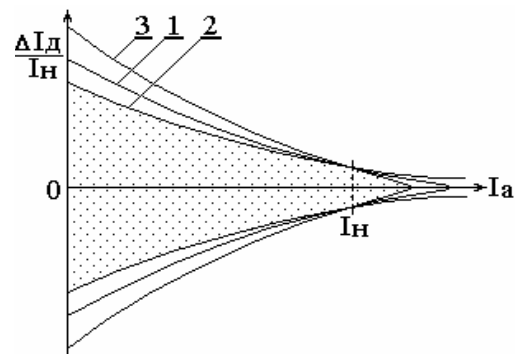


Рис. 5. Зоны безыскровой работы машины с отсутствием влияния потока главных полюсов: 1 –  $\alpha_{\text{ПАР}} = \alpha_{\text{ПОС}}$ ; 2 –  $\alpha_{\text{ПАР}} > \alpha_{\text{ПОС}}$ ; 3 –  $\alpha_{\text{ПАР}} < \alpha_{\text{ПОС}}$

Для ЯМПТ коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha < 0,7$ , таким образом ширина зоны коммутации  $\Phi_{\text{ВЗК}}$  не превышает 70 % нейтральной зоны, что исключает проникновение основного магнитного потока в зону коммутации, наведение этим потоком ЭДС в коммутируемых секциях и позволяет пренебречь влиянием этого поля на характер коммутации. В НПМПТ при таких же значениях  $\alpha$  зачастую наблюдается искрение под щеткой, т.е. затрудненная коммутация, даже в режиме холостого хода (рис. 6), когда нет поля реакции якоря. Это указывает на существенное воздействие поля главных полюсов на коммутацию в НПМПТ.

При  $\alpha_{\text{ПАР}} > \alpha_{\text{ПОС}}$  можно обеспечить сохранение формы распределения индукции в зазоре при переходе от режима холостого хода к номинальному току последовательной ОВ, так как возрастание МДС последовательной ОВ по оси полюса может компенсировать уплощение кривой индукции из-за насыщения зубцов по оси полюса. Также при нагрузках до номинальных большой зубец дополнительного полюса оказывает лучший теплоотвод для более нагруженной в этих режимах параллельной ОВ, так как в этом случае ка-

тушки параллельной ОВ расположены ближе к оси дополнительного полюса.

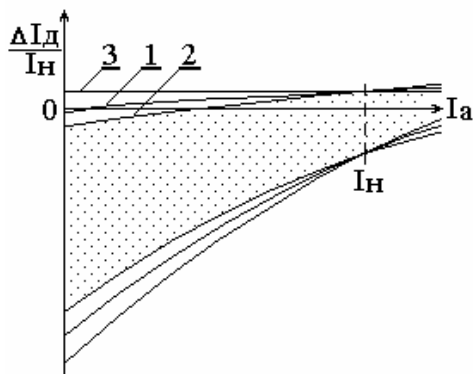


Рис. 6. Зоны безыскровой работы машины с существенным влиянием потока главных полюсов: 1 –  $\alpha_{ПАР} = \alpha_{ПОС}$ ; 2 –  $\alpha_{ПАР} > \alpha_{ПОС}$ ; 3 –  $\alpha_{ПАР} < \alpha_{ПОС}$

Определение характеристик НПМГПТ при  $\alpha_{ПАР} \neq \alpha_{ПОС}$  для возможности использования характеристики намагничивания машины при  $\alpha_{дН}$  выполняется с приведением МДС параллельной и последовательной ОВ к МДС возбуждения при  $\alpha_{дН}$ . В качестве коэффициентов приведения можно принять отношения  $\alpha_{дН}$  к  $\alpha_{ПАР}$  и  $\alpha_{ПОС}$ . Тогда МДС возбуждения  $F_B$  при  $\alpha_{дН}$  определяется как

$$F_B = J_{ПАР} W_{ПАР} \frac{\alpha_{ПАР}}{\alpha_{дН}} + J_{ПОС} W_{ПОС} \frac{\alpha_{ПОС}}{\alpha_{дН}}$$

и появляется возможность использования характеристики намагничивания машины при  $\alpha_{дН}$  (рис. 7).

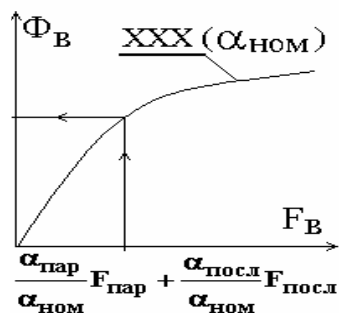


Рис. 7. Использование характеристики намагничивания НПМГПТ для  $\alpha_{дН}$  при  $\alpha_{ПАР} \neq \alpha_{ПОС}$  с приведением МДС параллельной и последовательной обмоток возбуждения к МДС машины

С помощью разработанной системы проектирования [4] рассчитан ряд вариантов НПМГПТ мощностью 40 кВт для разных соотношениях  $\alpha_{ПАР}$  и  $\alpha_{ПОС}$  при неизменном  $\alpha_{дН} = 0,7$ . При номинальной нагрузке кривые распределения МДС для разных соотношений  $\alpha_{ПАР}$  и  $\alpha_{ПОС}$  практически одинаковые. Для НП ДПТ 40 кВт приняты следующие числа витков на полюс:  $W_{ПАР} = 602$  и  $W_{ПОС} = 4$ . Рассмотрены три варианта расположения катушек параллельной и последовательной ОВ при  $\alpha_{дН} = 0,7$ :

1) четыре катушки параллельной и три катушки последовательной ОВ на полюс (пропорцио-

нальное распределение  $W_{ПАР}$  и  $W_{ПОС}$  по пазам, всего 7 катушек) с  $\alpha_{ПАР}/\alpha_{ПОС} = 0,7/0,7$ ;

2) по две катушки обеих ОВ на полюс (непропорциональное распределение  $W_{ПАР}$  и  $W_{ПОС}$  по пазам, всего 4 катушки) с  $\alpha_{ПАР}/\alpha_{ПОС} = 0,752/0,567$ ;

3) три катушки параллельной и одна катушка последовательной ОВ на полюс (непропорциональное распределение  $W_{ПАР}$  и  $W_{ПОС}$  по пазам, всего 4 катушки) с  $\alpha_{ПАР}/\alpha_{ПОС} = 0,655/0,8$ .

Выполнены расчеты магнитных полей методом конечных элементов (МКЭ) при разных токах обмоток ОВ и разных их распределениях. Расчеты магнитных полей выполнены на модели половины полюсного деления из 753 элементов при разных токах обмоток для всех вариантов. Для того чтобы вычлнить влияние способов распределения ОВ, магнитные поля обмотки якоря, компенсационной обмотки и обмотки дополнительных полюсов не рассматривались. По кривым распределения индукции в зазоре уточнены  $\alpha_{ПАР}$ ,  $\alpha_{ПОС}$ ,  $\alpha_d$ , значения основного магнитного потока и  $\Phi_{ВЗК}$ . Коэффициент  $\alpha_d$  рассчитан как отношение средней индукции в зазоре к индукции под центром полюса. С учетом влияния зубчатости на кривую распределения поля индукция под центром полюса определялась как средняя индукция на 5-ти зубцовых делениях по центру полюса, охватываемых всеми витками обеих ОВ. Часть потока  $\Phi_{ВЗК}$  и основной магнитный поток  $\Phi_B$  рассчитывались по значениям векторных магнитных потенциалов. Погрешность определения основного магнитного потока [4], по сравнению с расчетами МКЭ, не превышает 4%. Значения  $\alpha_d$  и зависимости его изменения от тока нагрузки, определенные по кривой МДС и по распределению индукции в зазоре, практически совпадают. Это свидетельствует о корректности подхода. Наблюдается уплощение кривой распределения индукции в зазоре, что проявляется в увеличении  $\alpha_d$  с ростом тока нагрузки. При  $\alpha_{ПОС} > \alpha_{ПАР}$  рост  $\Phi_{ВЗК}$  с ростом нагрузки происходит с большей интенсивностью. Различие результатов определения  $\alpha_d$  предложенными способами (по кривой МДС и по распределению индукции в зазоре, полученному МКЭ) не превышает 6%. Проанализировано изменение кривых МДС ОВ с ростом нагрузки. Определены графики изменения  $\alpha_d$  и  $\Phi_{ВЗК}$  (рис. 8). Результаты расчетов сведены в таблицу.

#### Результаты расчетов $\alpha_d$ , $\Phi_B$ и $\Phi_{ВЗК}$

$\alpha_{ПАР}/\alpha_{ПОС}$ (по МДС)	Параметр	$I_{ПОС}/I_{ПОС.Н}$			
		0	0,5	1,0	1,5
0,655/0,8 0,7/0,7 0,752/0,567	$\alpha_d$ (МДС)	0,655	0,68	0,699	0,712
		0,7	0,7	0,7	0,7
		0,752	0,719	0,697	0,68
0,655/0,8 0,7/0,7 0,752/0,567	$\alpha_d$ (МКЭ)	0,637	0,673	0,701	0,72
		0,671	0,690	0,698	0,706
		0,725	0,714	0,703	0,695
0,655/0,8 0,7/0,7 0,752/0,567	$\Phi_B$ , о.е. (МКЭ)	0,788	0,902	0,999	1,069
		0,836	0,93	1,00	1,057
		0,899	0,957	1,004	1,043
0,655/0,8 0,7/0,7 0,752/0,567	$\Phi_{ВЗК}$ , о.е. (МКЭ)	0,734	0,864	0,997	1,097
		0,838	0,924	1,00	1,064
		0,947	0,975	0,997	1,017

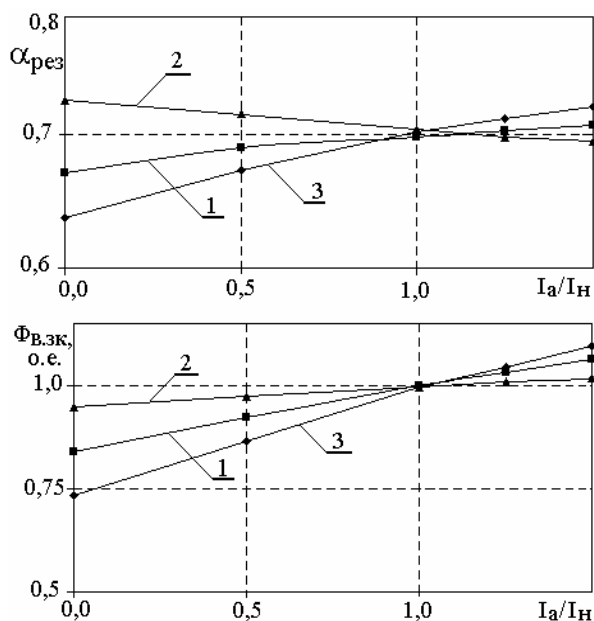


Рис. 8. Графики изменения  $\alpha_{рез}$  и  $\Phi_{в.зк}$  с ростом тока якоря: 1 –  $\alpha_{ПАР} = \alpha_{ПОС}$ ; 2 –  $\alpha_{ПАР} > \alpha_{ПОС}$ ; 3 –  $\alpha_{ПАР} < \alpha_{ПОС}$

Таким образом, способ распределения параллельной и последовательной обмоток возбуждения по пазам статора оказывает существенное влияние на характеристики и коммутацию неявнополюсных двигателей постоянного тока смешанного возбуждения, что необходимо учитывать при разработке и расчете таких машин.

#### Список литературы

1. Кожевников В.А., Копылов И.П. Развитие теории и конструкции машин постоянного тока. – Л.: Наука, 1985.
2. Хвостов В.С. Электрические машины: Машины постоянного тока: Учебник для студ. электромех. спец. вузов / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988.
3. Битюцкий И.Б. Математическая модель формирования реактивной ЭДС крупной машины постоянного тока // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 5. – С. 22–25.
4. Казаков Ю.Б. Матричный анализ и синтез схем статорных обмоток неявнополюсных машин постоянного тока // Электричество. – 1997. – № 4. – С. 41–44.
5. Казаков Ю.Б., Шишкин В.П. Влияние основного магнитного потока на коммутацию в неявнополюсных машинах постоянного тока // Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 3. – С. 3–5.

Казаков Юрий Борисович,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
 доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,  
 телефон (4932) 26-97-06,  
 e-mail: elmash@em.ispu.ru