

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

К. А. ХОРЬКОВ, В. Н. ДМИТРИЕВ, Е. Е. ДУТЛОВ

(Представлена объединенным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Работа вращающихся электрических машин неизбежно сопровождается вибрациями, которые могут быть подразделены на вибрации механического, аэродинамического и магнитного происхождения. Причиной последних являются переменные магнитные силы, возникающие на полюсных наконечниках вследствие периодического изменения магнитной проводимости воздушного зазора при вращении зубчатого якоря. Учитывая все возрастающие требования к уровню вибраций машин постоянного тока, изучение переменной составляющей магнитного поля в воздушном зазоре машины становится актуальной задачей.

С целью изучения изменений распределения магнитного поля под полюсным наконечником при движении зубчатого якоря была создана экспериментальная установка на базе двигателя постоянного тока П-40.

Испытуемая машина имеет несколько смежных якорей с различным числом зубцов. В настоящей работе приводятся результаты исследований магнитного поля в зазоре машины при якорях, имеющих зубцовое деление с прямыми зубцами, скосом зубцов на одно зубцовое деление и скосом зубцов «елочкой», а также якоря с 27 зубцами, скошенными на одно зубцовое деление.

На зубцах якорей были расположены датчики э.д.с. согласно рис. 1. Расположение датчиков вдоль зубцов якорей и вдоль окружности якоря позволяет проанализировать изменение потокоцеплений датчиков с обмоткой полюсов, а следовательно, соответствующих потоков между участками зубцов якоря и полюсов машины. Типичная осциллограмма э.д.с. датчика представлена на рис. 2.

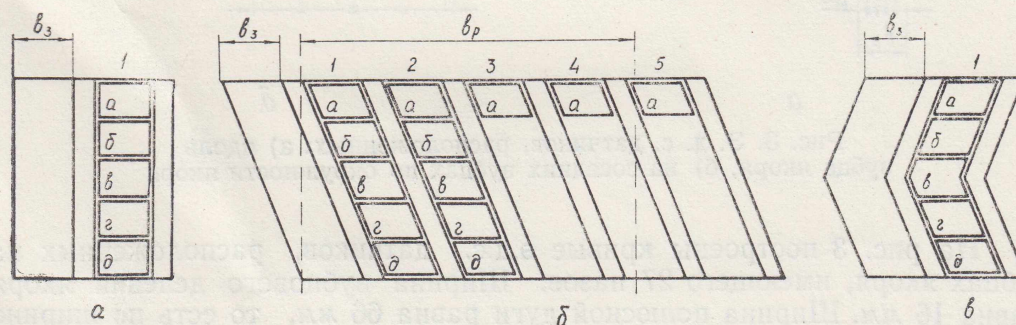


Рис. 1. Схема расположения датчиков э. д. с. на зубцах якоря, выполненных: а) без скоса зубцов, б) с линейным скосом зубцом, в) со скосом зубцов «елочкой».

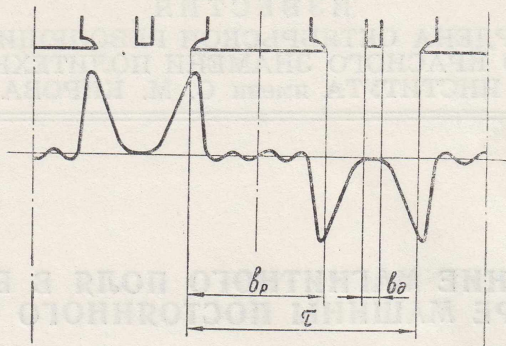


Рис. 2. Кривая э. д. с. датчика

Кривая э.д.с. датчика при прохождении якоря под полюсом имеет два всплеска: первый пик соответствует появлению магнитной связи участка зубца якоря и полюса при вхождении данного участка зубца под полюс, второй пик соответствует разрыву магнитной связи между ними при выходе зубца из-под полюса. При движении зубца под полюсом магнитный поток, проходящий через рамку датчика, остается практически постоянным. Небольшие пульсации в кривой э.д.с. на этом участке вызваны некоторым изменением общего магнитного потока под полюсом в связи с дробным числом зубцовых делений, приходящихся на ширину полюсного наконечника, при выходе из-под полюса зубцов, лежащих впереди зубца с датчиком, и входе под полюс следующих за ним зубцов. При скосе зубцов якоря указанное явление незначительно.

Обращает внимание тот факт, что внутренний фронт импульсов э.д.с. датчиков более крутой. Это соответствует большей скорости изменения потока под кромкой полюса по сравнению с изменением потока в межполюсном пространстве.

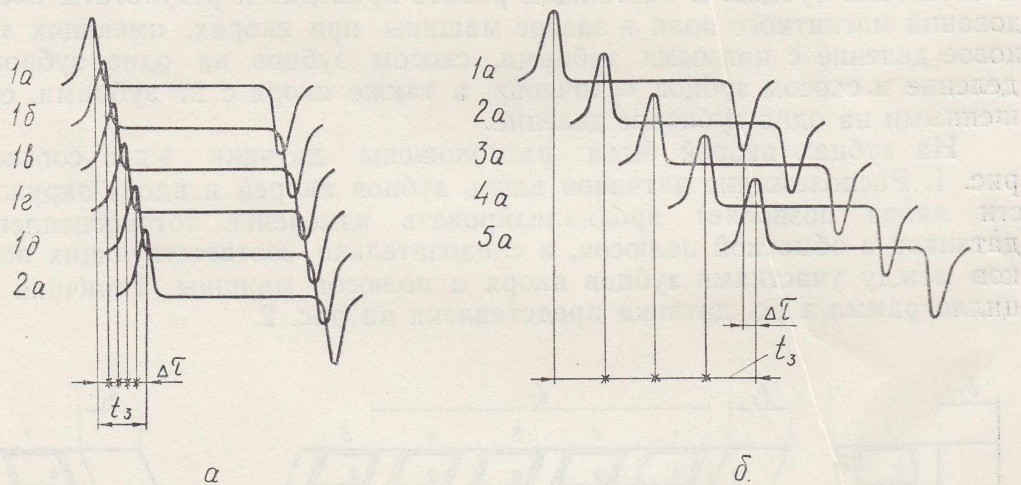


Рис. 3. Э. д. с. датчиков, расположенных: а) вдоль зубца якоря, б) на соседних зубцах по окружности якоря

На рис. 3 построены кривые э.д.с. датчиков, расположенных на зубцах якоря, имеющего 27 пазов. Ширина зубцового деления якоря равна 16 мм. Ширина полюсной дуги равна 66 мм, то есть по ширине полюсной дуги укладывается 4,12 зубцовых деления. Ширина открытия пазов якоря равна 3,5 мм. Датчики, уложенные на зубцах якоря, были предварительно тарированы.

Приведенные осциллограммы со всей очевидностью показывают, что при выходе зубца якоря из-под полюса магнитный поток перехватывается зубцом, входящим под полюс.

При целом числе зубцовых делений под полюсным наконечником набегающие и сбегающие зоны зубцов будут расположены симметрично и на полюс будут воздействовать две равные, симметрично расположенные силы магнитного тяжения.

При вращении якоря линия приложения сил плавно перемещается от одного торца полюса к другому, например, из зоны 1 а к зоне 1 д, затем при полном выходе зубца 1 из-под полюса силы возникают в зоне 2 а и перемещаются к зоне 2 д и т. д. Тангенциальные составляющие сил направлены в противоположные стороны и взаимно друг друга уравнивают. Радиальные и аксиальные составляющие сил попарно складываются.

Аксиальные составляющие сил магнитного тяжения создают постоянно действующий крутящий момент, точка приложения которого перемещается по горизонтальной оси полюса при вращении якоря. Радиальные составляющие сил магнитного тяжения направлены в одну сторону и перемещаются вдоль горизонтальной оси полюса, создавая таким образом, даже при идеальном исполнении машины силы, раскачивающие полюс.

При дробном числе зубцовых делений под полюсным наконечником набегающие и сбегающие зоны зубцов будут расположены несимметрично, и точки приложения сил будут смещены друг относительно друга. Это вызывает появление пар сил, действующих в тангенциальном и радиальном направлениях. Появление добавочного крутящего момента приводит к появлению колебаний полюса вокруг его вертикальной оси и к качаниям полюса с угла на угол по диагонали.

При несимметрии воздушных зазоров под набегающим и сбегающим краями полюса нарушается равенство сил, действующих по обе стороны полюса, что приводит к резкому увеличению вибраций машины.

На рис. 4 представлены кривые э.д.с. датчиков, расположенных на зубцах якорей, имеющих  $Z_{я}=31$  и отличающихся между собой скосом

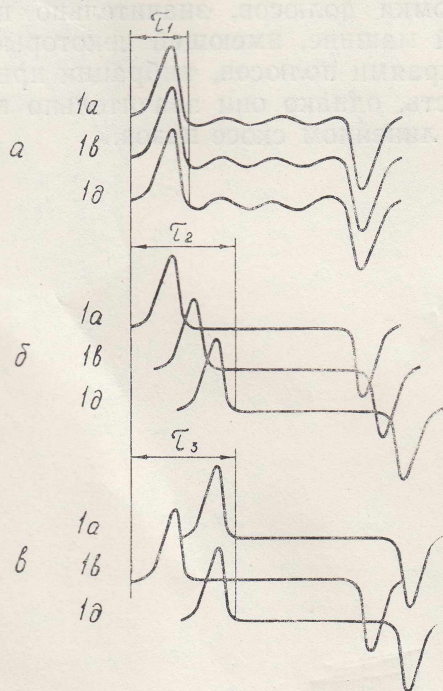


Рис. 4. Э. д. с. датчиков, расположенных на зубцах якорей: а) без скоса зубцов, б) при линейном скосе зубцов, в) при скосе зубцов «елочкой»

зубцов. При прямых зубах якоря кривые э.д.с. всех датчиков находятся в фазе, то есть на края полюса действуют силы, складывающиеся арифметически из отдельных единичных сил, действующих на участки кромки полюса по длине активной части машины. Очевидно, что можно так подобрать ширину полюсного наконечника, что силы сбегающего и набегающего краев будут уравнивать друг друга. При этом никаких перемещающихся сил не будет. Однако на практике очень сложно добиться равномерных зазоров под набегающим и сбегающим краями полюсов из-за больших технологических допусков, в частности, на элементы крепления полюсов. Учитывая, что сила, действующая на кромки полюсов, значительна, линейные отклонения в зазорах вызывают значительные вибрации. Вибрации испытуемой машины с якорем, имеющим прямые пазы, в 2÷3 раза превышают вибрации машины с якорем, имеющим скос зубцов.

При скосе зубцов якоря кривые э.д.с. датчиков сдвинуты по фазе. Время входа зубца под полюс при скосе на одно зубцовое деление увеличивается по сравнению с первым случаем в два раза. В результате этого силы притяжения при входе и выходе зубцов из-под полюса распределяются во времени, и величина результирующей силы становится в несколько раз меньше. Анализ явлений, сопровождающих вращение якоря со скошенными пазами, описан выше. В отличие от якоря с прямыми пазами, где на кромки полюсов действуют пульсирующие с зубцовой частотой силы, при якоре со скосом зубцов на одно зубцовое деление действуют постоянные по величине силы с перемещающимися точками приложения.

Наилучшим, с точки зрения распределения потоков, а следовательно, сил магнитного тяжения под краями полюсов, является выполнение якоря со скосом зубцов «елочкой». Из рис. 4, в очевидно, что э.д.с. датчиков смещается по фазе симметрично относительно центральной линии полюса. То есть при вращении якоря силы магнитного тяжения действуют в четырех точках одновременно, перебегая от центральной линии полюса к его торцам синхронно друг с другом. Это приводит к тому, что в идеально выполненной машине взаимно уравнивают друг друга все силы: тангенциальные, радиальные и аксиальные. В то же время наличие скоса зубцов приводит к тому, что величина результирующих сил, действующих на кромки полюсов, значительно ниже, чем при прямых зубах. В реальной машине, имеющей некоторые неравенства воздушных зазоров под краями полюсов, вибрации при выполнении зубцов якоря «елочкой» есть, однако они значительно ниже, чем при прямых пазах якоря и при линейном скосе пазов.