

УДК 621.313.22

**Ивченко Н. В.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА НА МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В настоящее время машины постоянного тока (МПТ) активно применяются во всех отраслях промышленности Украины и зарубежья. Однако, надежность МПТ – относительно низка, что является существенным недостатком при их эксплуатации [1, 2].

Отказы МПТ приводят к остановке технологического процесса, значительным затратам времени и средств на устранение неисправности и зачастую их тяжелых последствий.

Таким образом, надежность МПТ является одним из основных факторов, определяющих производительность технологического процесса, его экономичность и безопасность.

Наибольшее число отказов в машинах постоянного тока, используемых в приводе при тяжелых условиях работы, приходится на щеточно-коллекторный узел. В зависимости от условий эксплуатации они составляют 60–66 % от общего числа отказов машин [3, 4].

Одним из эффективных путей повышения надежности МПТ является диагностика их параметров при изготовлении и послеремонтных работах, а также диагностирование текущего состояния и прогнозирование состояния МПТ в процессе их эксплуатации [3]. В результате применения систем диагностики возможен переход к обслуживанию машин по текущему состоянию, отказ от планово-предупредительных ремонтов, резкое сокращение ремонтных затрат – как финансовых, так и затрат времени [4].

Системы диагностики позволяют на основе периодически измеряемых рабочих параметров определять текущее состояние объекта и его составных частей, а также прогнозировать время безотказной работы и сигнализировать о возникновении неисправностей на ранних стадиях их развития.

Построение интеллектуальных систем диагностики МПТ подразумевает анализ электромагнитных и электромеханических процессов, протекающих в машине, законов их изменения в аномальных режимах работы, определение информативных параметров, напрямую или косвенно позволяющих однозначно определить текущее состояние машины и на основе определения зависимостей изменения этих параметров прогнозировать дальнейшее ее состояние.

Цель работы – исследование электромагнитных процессов машины постоянного тока при неисправностях щеточно-коллекторного узла и оценка их влияния на основной магнитный поток машины.

Для диагностики состояния МПТ необходимо выявлять информативные диагностические признаки зарождающихся неисправностей ее узлов. Для решения этой задачи необходимо исследовать электромагнитные процессы в цепях машины при появлении неисправностей.

Для расчета результирующего магнитного поля МПТ с учетом неоднородности магнитной цепи, геометрии машины и свойств применяемых материалов, целесообразно пользоваться методом конечных элементов (Finite Element Method – FEM). Это позволяет учесть изменение магнитной проводимости узлов МПТ при вращении якоря в рабочем режиме [5, 6].

Математическим описанием непрерывных в пространстве и во времени процессов распределения электромагнитного поля, полей механических деформаций и т. п. являются дифференциальные уравнения в частных производных. Различают стационарные (не меняющиеся во времени) и нестационарные (переменные, меняющиеся во времени) процессы. Стационарные процессы описываются эллиптическими уравнениями, а нестационарные – уравнениями параболического и гиперболического типов [4].

Эти уравнения для электромагнитных полей относительно характеристик поля (векторов напряженности электрического и магнитного полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ ; векторов электрической и магнитной индукции  $\vec{D}$  и  $\vec{B}$ ; векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$ , скалярного электрического потенциала  $\varphi$ ) получают из преобразования уравнений Максвелла [4].

В ходе расчета используются уравнения Лапласа и Пуансона.

Простейшим эллиптическим уравнением является уравнение Лапласа:

$$\Delta u = 0, \quad (1)$$

где лапласиан  $\Delta = \nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ .

В декартовой системе координат уравнение Лапласа имеет вид:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

где  $\varphi(x, y, z)$  – скалярная функция [4].

К уравнениям эллиптического типа относится уравнение Пуассона, которое для линейных изотропных ( $\mu_x = \mu_y = \mu_z = \mu = \text{const}$ ) сред имеет вид:

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_a \vec{J}, \quad (3)$$

где  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал;

$\vec{J}$  – вектор плотности тока;

$\mu_a = \mu \mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость среды моделирования.

В случае нестационарных процессов используются уравнения, представляющие собой полностью связанное физическое решение динамики:

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} = \vec{J} - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c + \sigma \nu \times \nabla \times \vec{A}, \quad (4)$$

где  $V$  – скаляр электрического потенциала;

$H_c$  – напряженность магнитного поля постоянного магнита;

$\nu$  – скорость;

$\sigma$  – удельная проводимость среды [6, 7].

В качестве инструмента исследований используется программная оболочка для выполнения задач метода конечных элементов в электромеханике Ansoft Maxwell.

В программе RМхрегт, входящей в состав пакета Ansoft Maxwell v14, задаются необходимые параметры исследуемой электрической машины, на основании которых создается ее геометрия с учетом свойств материалов, используемых в машине и условий ее эксплуатации (мощность, режим работы, скорость вращения, переменные напряжения и т. п.).

Геометрия машины постоянного тока, соответствующая паспортным данным выбранного для исследований ДПТ серии 2ПБ112МУХЛ4 с расчетной сетью конечных элементов (номинальная мощность 1,4 кВт, ток якоря 7,74 А, номинальная скорость вращения 3000 об/мин, рабочая скорость вращения 1080 об/мин) представлена на рис. 1.

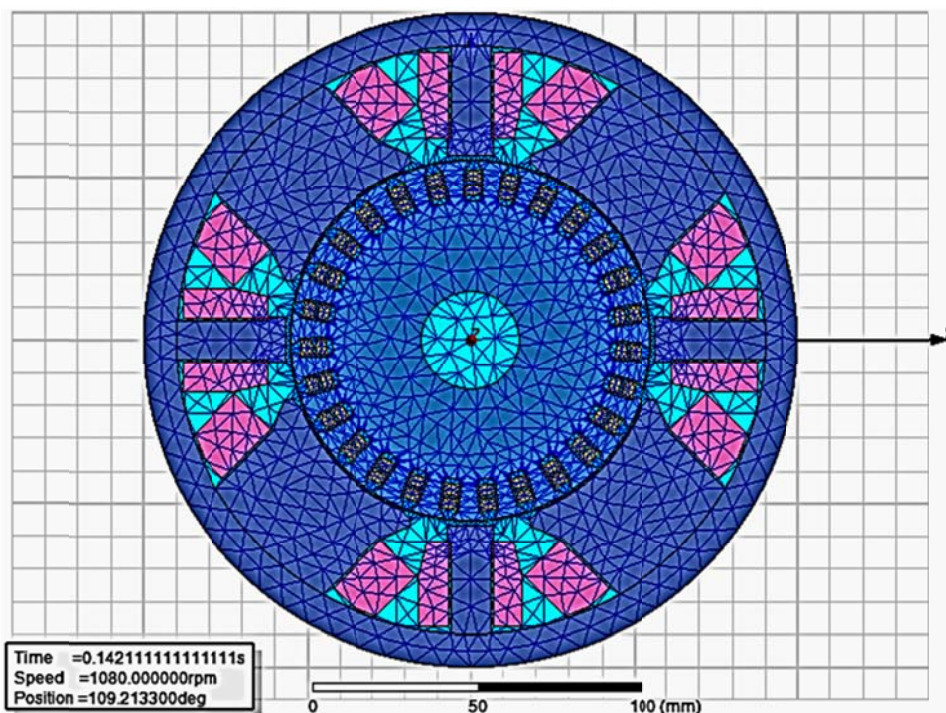


Рис. 1. Поперечний розрез досліджуваної МПТ з розрахунковою сіткою кінцевих елементів

Програмний пакет Ansoft Maxwell v14 дозволяє автоматично вибудувати необхідну для моделі розрахункову сітку (mesh), підходящу для даного конкретного випадку. При необхідності, параметри розрахункової сітки можна змінювати.

Розмір елемента змінюється, для отримання точних результатів розрахунку при мінімумі використовуваних обчислювальних потужностей. Найменшим розміром володіють елементи-полігони в зоні повітряного зазору машини (рис. 2).

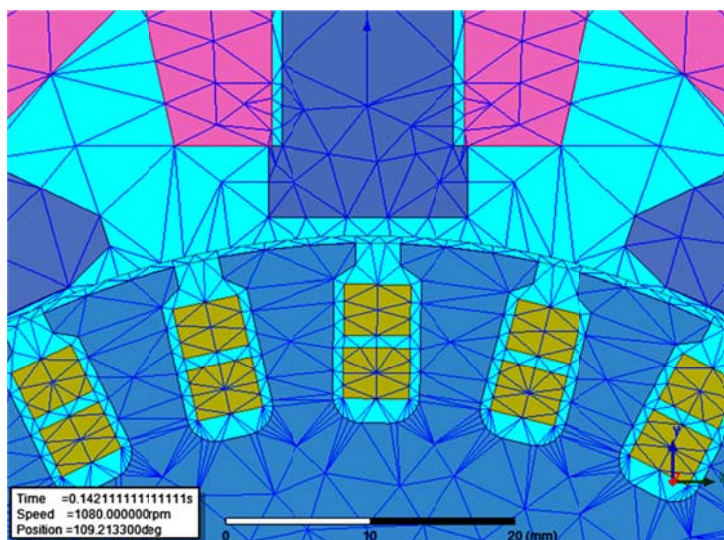
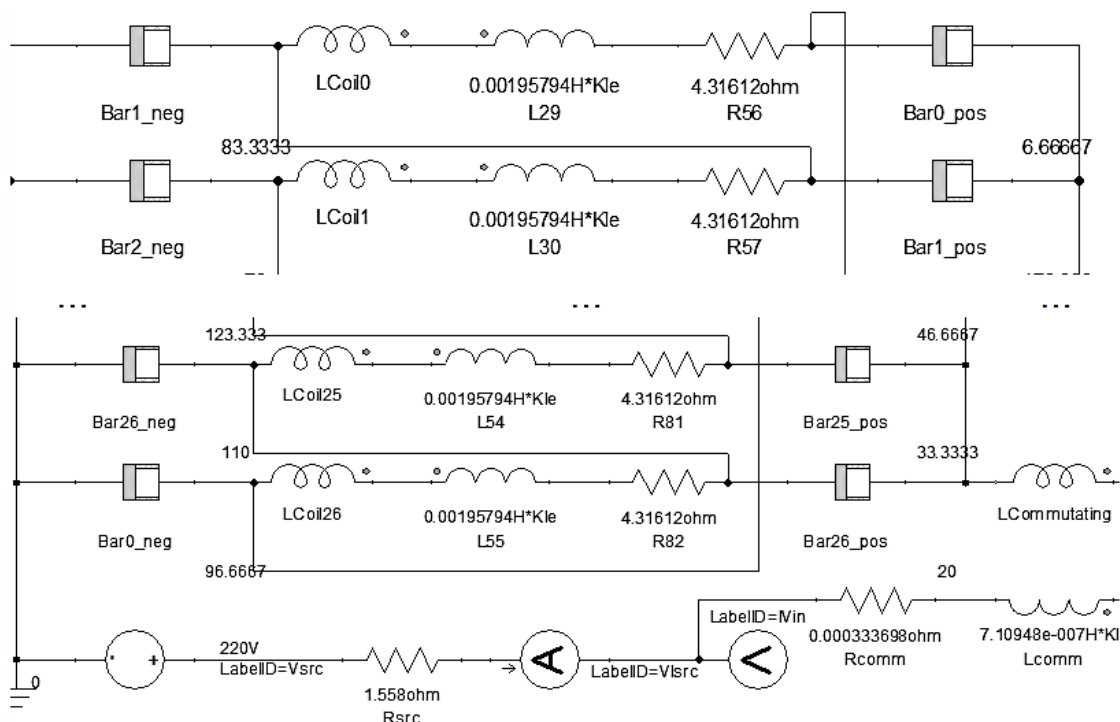


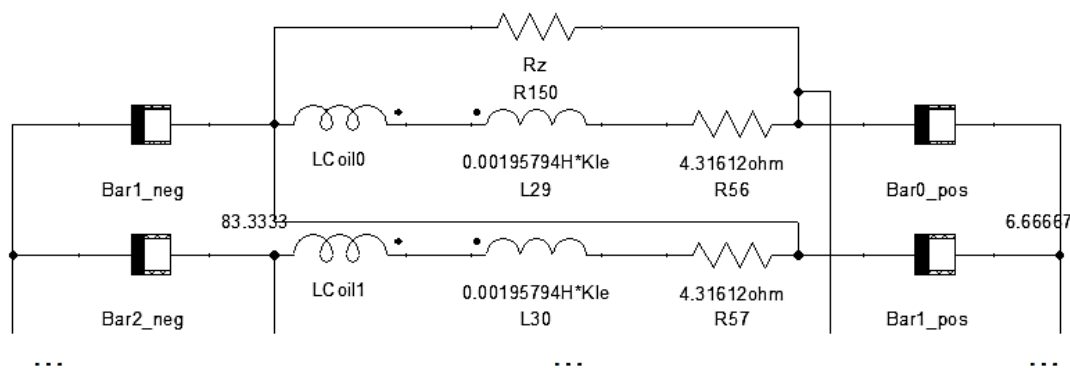
Рис. 2. Участок розрахункової сітки в повітряному зазорі МПТ

Отримана математична модель МПТ дозволяє проводити спільний розрахунок магнітного і електричного полів МПТ і отримувати в результаті графіки миттєвих значень основних змінних величин МПТ – напруги на зажимах якорної ланки, ланки збудження, струму якорної ланки і ланки збудження, головного магнітного потоку, потокосцеплень обмоток машини і окремих секцій обмоток і т. д.

Для исследования влияния неисправностей щеточно-коллекторного узла МПТ на электромагнитные и электромеханические процессы необходимо рассмотреть математическую модель электрической цепи машины с учетом работы щеточно-коллекторного узла и неоднородности магнитной цепи МПТ, соответствующей ее геометрии. Схема замещения обмотки якоря МПТ при отсутствии неисправностей и замыкании двух пластин коллектора между собой, представлены на рис. 3.



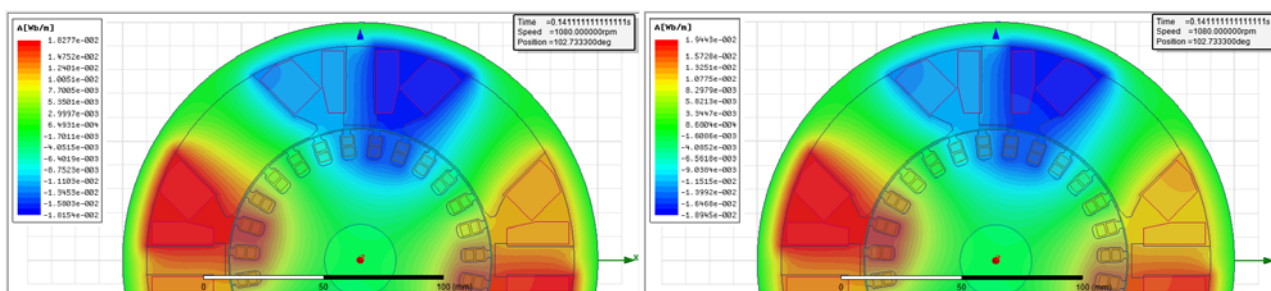
а – схема Maxwell Circuit, соответствующая обмотке якоря МПТ при отсутствии неисправностей



б – участок схемы Maxwell Circuit, соответствующий замыканию пластин коллектора на сопротивление Rz

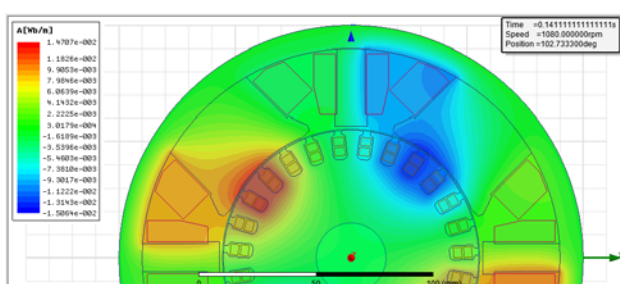
Рис. 3. Схемы Maxwell Circuit, соответствующие различному состоянию обмотки якоря МПТ

В результате расчетов получены значения магнитных индукции и потока для каждой расчетной точки элементов-полигонов, которые дают четкую картину распределения поля в поперечном разрезе. Линии распределения магнитного векторного потенциала МПТ полученные в результате математического моделирования в пакете программ Ansoft Maxwell представлены на рис. 4.

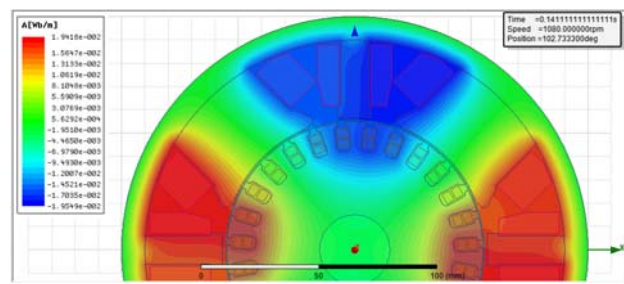


а – линии распределения магнитного векторного потенциала МПТ при отсутствии неисправностей

б – Линии распределения магнитного векторного потенциала МПТ при замыкании двух пластин коллектора



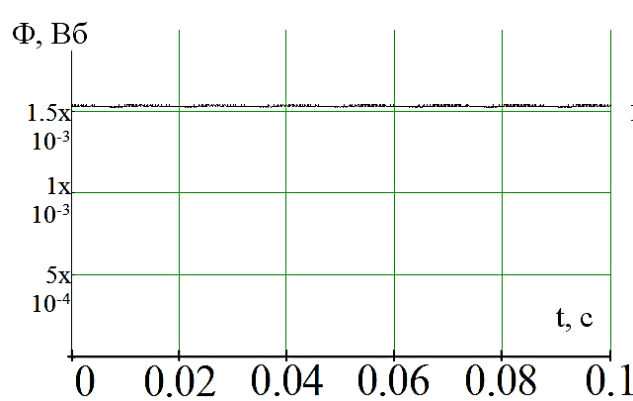
в – линии распределения магнитного векторного потенциала МПТ при смещении щеток с нейтральной (- 20°)



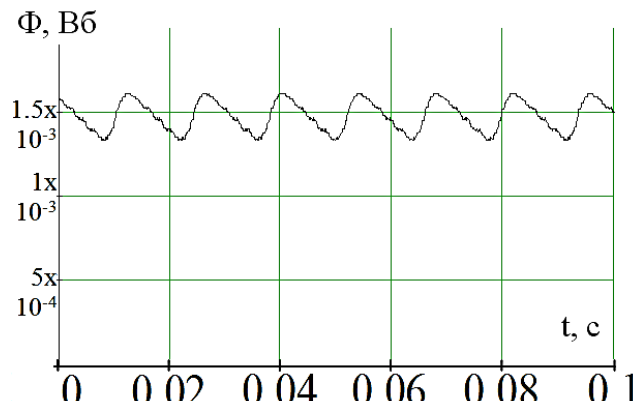
г – линии распределения магнитного векторного потенциала МПТ при смещении щеток с нейтральной (+ 20°)

Рис. 4. Линии распределения магнитного векторного потенциала МПТ, полученные в результате математического моделирования в пакете программ Ansoft Maxwell

Неисправности коллектора, связанные с замыканиями пластин коллектора между собой, а также со смещением щеток с нейтральной МПТ приводят к изменению картины распределения линий магнитного векторного потенциала в поперечном разрезе машины. При замыкании пластин коллектора это изменение незначительно (рис. 4, а, б). Смещение щеток с нейтральной приводит к значительным искажениям линий магнитного векторного потенциала за счет изменения реакции якоря (рис. 4, а, в, г).



а – мгновенное значение магнитного потока машины при отсутствии неисправностей

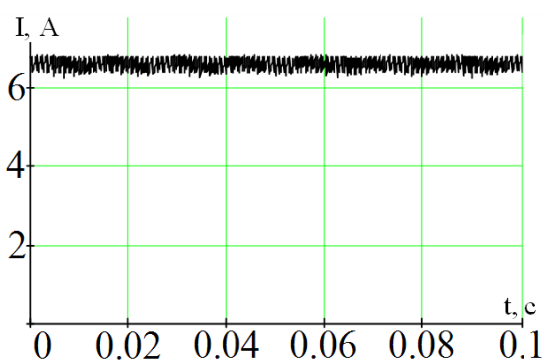


б – мгновенное значение магнитного потока машины при полном замыкании двух пластин коллектора

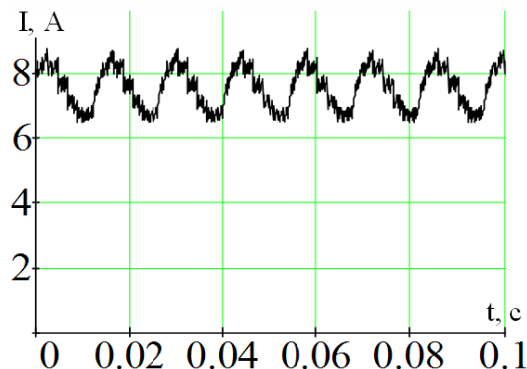
Рис. 5. Графики мгновенных значений магнитного потока машины при различном состоянии МПТ



Искажение магнитного поля МПТ приводит к качественному и количественному изменению сигнала тока якоря машины (рис. 6).



а – мгновенное значение тока якоря машины при отсутствии неисправностей



б – мгновенное значение тока якоря машины при полном замыкании двух пластин коллектора

Рис. 6. Данные сигнала тока якоря при различном состоянии щеточно-коллекторного узла

Спектральный анализ сигнала дает картину изменения амплитуд основных его составляющих – частот, кратных частоте вращения ( $p\omega/60$ ); частот, кратных числу зубцов якоря ( $z\omega/60$ ); частот ( $k\omega/60$ ), кратных количеству коллекторных пластин (рис. 7, 8).

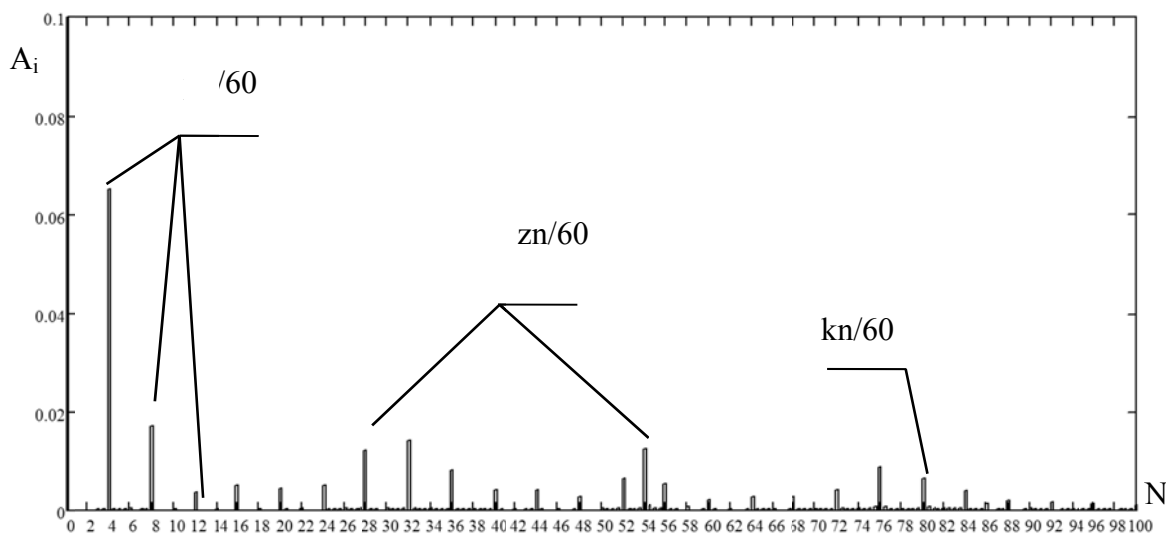


Рис. 7. Нормализованный спектр сигнала тока якоря при отсутствии неисправностей

Для усреднения картины гармонического состава пульсаций тока якоря, с целью отстройки результатов от величины нулевой гармоники (постоянной составляющей), используется относительная величина амплитуды каждой гармоники, полученная путем нормализации амплитуд спектра относительно нулевой гармоники (постоянной составляющей). Для выделения основных гармоник сигналов была также проведена нумерация гармонических составляющих спектров относительно частоты вращения вала машины.

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: при полном коротком замыкании двух коллекторных пластин амплитуды гармоник, кратных оборотной частоте  $p\omega/60$  – резко возрастают, что можно объяснить небалансом токов якоря и вызванными этим небалансом дополнительными пульсациями тока при вращении.

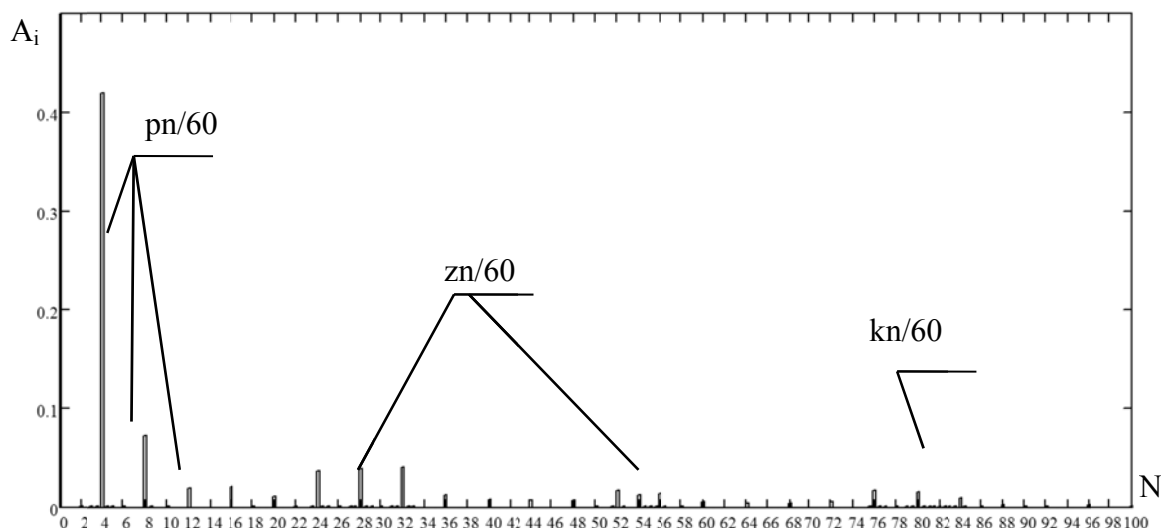


Рис. 8. Нормализованный спектр сигнала тока якоря при замыкании пластин коллектора

Амплитуды частот, кратных количеству зубцов якоря и числу коллекторных пластин уменьшаются при замыкании пластин. Это вызвано тем, что количество переключений обмоток якоря при его вращении уменьшается на 1 и частота пульсаций, связанных с этим переключением, снижается на 1, новая частота коллекторной гармоники составляет  $(k-1)n/60$ .

## ВЫВОДЫ

В результате математического моделирования машины постоянного тока с использованием метода конечных элементов получены картины распределения линий магнитного поля и выявлено их изменение при наличии неисправностей щеточно-коллекторного узла. Гармонический состав полученных сигналов мгновенных значений основного магнитного потока машины и тока якоря резко изменяется при появлении неисправности. Выявленные изменения амплитуд нормализованного спектра тока якоря могут быть использованы в качестве диагностических признаков возникающей неисправности коллектора МПТ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочник по электрическим машинам : в 2 т. Т. 1 / [под ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова]. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.*
2. *Котеленец Н. Ф. Испытания и надёжность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высш. шк., 1988. – 232 с.*
3. *Родькин Д. И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д. И. Родькин. – М. : Недра, 1992. – 240 с.*
4. *Сбор и анализ статистики отказов электрических агрегатов систем электрооборудования (СЭО) : Отчет о НИР (промежуточн.) / Киев. ин-т. инж. гражд. авиации. – 380 В-80; № ГР 80045052 ; Инв. № 2141. – К., 1980. – 72 с.*
5. *Андреева Е. Г. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS / Е. Г. Андреева, С. П. Шамец, Д. В. Колмогоров // Журнал Нефтегазовое дело, 2004 – 10 с. – Режим доступа к ресурсу: [http://www.ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf).*
6. *Zaki A. Modeling and analysis of PM brushed DC motor using FEM / A. Zaki, S. Ibrahim // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 2005. – P. 6–12.*
7. *Ishak D. Analytical modeling of permanent magnet excited brushed DC motor for low-cost applications / D. Ishak, A. H. A. Hassan // 5th International Symposium on Mechatronics and Its Applications, ISMA 2008, 2008 – P. 1–5.*