

## КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ В ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ С ВИТОЙ КАТУШКОЙ

*Виконано якісний аналіз ефекту близькості в індукційно-динамічному приводі з витою катушкою. Проведено оцінку коефіцієнта заповнення катушки та запропоновано рекомендації до її виконання.*

*Выполнен качественный анализ эффекта близости в индукционно-динамическом приводе с витой катушкой. Проведена оценка коэффициента заполнения катушки и предложены рекомендации по ее выполнению.*

### ВВЕДЕНИЕ

Индукционно-динамические приводы находят все более широкое применение в быстродействующих коммутационных аппаратах и применяются как для непосредственного воздействия на контакты, так и в качестве расцепителей. Основными элементами конструкции известного привода являются цилиндрическая катушка, проводящий диск, располагаемый симметрично вблизи торцевой поверхности катушки, конденсаторная батарея и система управления, обеспечивающая ее предварительный заряд и последующий разряд на катушку в аварийном режиме. Принцип действия привода основан на отталкивании проводящего диска от торцов катушки в момент начала аварийного процесса. В этот момент системой управления обеспечивается подключение катушки к батарее. В процессе ее разряда в диске наводятся вихревые токи. Электродинамические усилия, характеризующие взаимодействие токов катушки и диска, отталкивают диск от неподвижной катушки и приводят в действие механизм отключения быстродействующего коммутационного аппарата.

Основные направления совершенствования конструкции индукционно-динамического привода связаны с оптимизацией параметров напряжения и емкости конденсаторной батареи системы управления [1]. Как показано в [1], при этом на второй план выносятся задачи уменьшения времени срабатывания индукционно-динамического привода.

Анализ процессов срабатывания индукционно-динамического привода показывает [1], что токи в катушке при разряде конденсаторной батареи являются импульсными, и характеризуются широким спектром гармоник. В этом случае важно оценить влияние поверхностного эффекта и эффекта близости катушки и диска индукционно-динамического привода. Из теории поверхностного эффекта известно, что характер распределения переменного тока по сечению проводника неравномерен и зависит от нескольких факторов [2]. Кроме того, при разряде конденсатора на катушку индукционно-динамического привода возникает переходный процесс, обусловленный проникновением электромагнитного поля в проводники. При расчетах индукционно-динамического привода необходимо учитывать зависимость электрического сопротивления проводников с токами от взаимного расположения токопроводящих элементов, частотного спектра токов, пространственного перераспределения плотностей токов в проводниках в зависимости от

частоты и близости расположения элементов с токами. В индукционно-динамическом приводе рассматривался эффект близости катушки и диска [3]. Основное практическое значение этого эффекта связано с ограничением высоты катушки, плотность тока в которой существенна. В работе [4] рассмотрены физические основы поверхностного эффекта в массивных проводниках с импульсным электрическим током в случае действия импульса тока очень большой амплитуды. Теоретические исследования нестационарного линейного и нелинейного поверхностного эффекта, касающиеся в основном плоских конструкций проводников с неограниченными толщинами их стенки, приведенные в работах [5-11]. В данной статье рассматривается распределение плотности тока в многослойной катушке при действии импульса тока с амплитудой, ограниченной сопротивлением материала катушки.

**Цель работы** – качественный анализ эффекта близости при взаимодействии токов слоев катушки индукционно-динамического привода.

**Задачи исследования.** Оценка коэффициента заполнения катушки индукционно-динамического привода, качественный анализ эффекта близости при взаимодействии токов слоев катушки.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для анализа эффекта близости используется геометрическая модель электропроводных элементов индукционно-динамического привода с учетом технологических условий изготовления катушки. На рис. 1 приведен вид индукционно-динамического привода с витой катушкой.

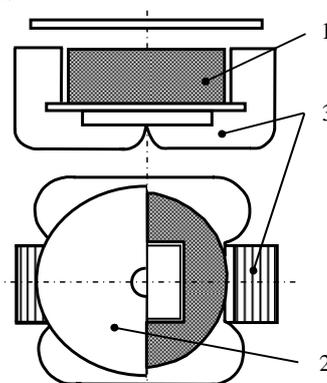


Рис. 1

Обозначения на рис. 1: 1 – катушка; 2 – диск; 3 – магнитная система. Катушка 1 выполнена из медной ленты, навиваемой на квадратный каркас по технологии, обеспечивающей наибольший коэффициент заполнения с учетом жесткости ленты. Диск 2 выполнен сплошным с отверстием небольшого диаметра для крепления к подвижной рейке индукционно-динамического привода (на рис. 1 не показана). Магнитная система 3 выполнена из листов электротехнической стали, набранных в два U-образных магнитопровода одинакового сечения, с общей стороной внутри катушки.

На рис. 2 показаны геометрические размеры модели.

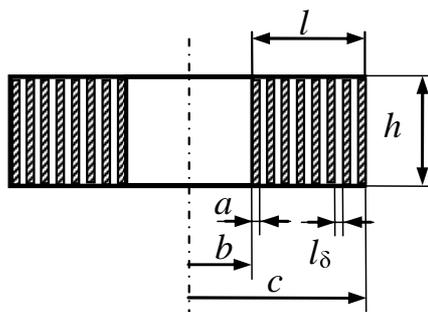


Рис. 2

Основные геометрические размеры:  $h$  – высота ленты катушки;  $a$  – толщина ленты;  $l_\delta$  – расстояние между слоями;  $l$  – толщина обмотки;  $b$ ,  $c$  – внутренний и наружный (габаритный) размеры катушки.

На основании геометрической модели определяется коэффициент  $k$  заполнения катушки и среднее расстояние  $l_\delta$  между ее слоями.

Соотношение для определения расстояния между слоями катушки может быть представлено в виде

$$l_\delta = \frac{S_1 - S_{c1}}{h \cdot w} = \frac{S_1(1-k)}{h \cdot w}; \quad (1)$$

где  $S_1$  – сечение катушки;  $S_{c1}$  – сечение меди;  $w$  – число витков катушки;  $k = S_{c1}/S_1$  – коэффициент заполнения катушки.

### КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Кроме указанного вида эффекта близости необходимо рассмотреть и второй вид – перераспределение плотности тока в слоях катушки индукционно-динамического привода. На рис. 3 показана схема расположения слоев витой катушки.

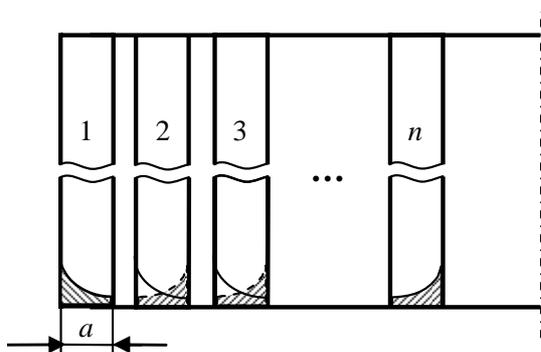


Рис. 3

При проведении качественного анализа эффекта близости при взаимодействии токов слоев катушки индукционно-динамического привода используются следующие допущения:

- рассматривается взаимодействие токов только пар соседних проводников;
- электромагнитные процессы рассматриваются в пределах проводников постоянного объема;
- принимается, что слои располагаются симметрично оси катушки.

Пусть имеется индукционно-динамический привод с катушкой, содержащей  $v$  слоев ( $v = \overline{1, n}$ ). Слои катушки рассматриваются как близко расположенные параллельные проводники прямоугольного сечения, по которым протекают переменные токи в одном направлении. Ток в сечении разбивается на линии тока с плотностью  $\gamma$ . В соответствии с принятым допущением, величина плотности тока в слое зависит от величины поля, действующего от соседнего слоя. Для качественного анализа рассматриваются токи и поля для одной частоты. При этом для их описания можно воспользоваться комплексными величинами.

Если предположить, что пара слоев ленты витой катушки находятся на значительном расстоянии друг от друга, то величина плотности тока в направлении по толщине слоя ленты определяется на основании закона Ома в дифференциальной форме и может быть представлена в виде [5]:

$$\underline{\delta}(x) = \gamma \underline{E}(x) = \frac{\underline{I}}{2a} p \frac{\text{ch}px}{\text{sh}p(h/2)}, \quad (2)$$

где  $x$  – переменная координата по толщине ленты, отсчитываемая от оси слоя;  $\underline{\delta}(x)$  – комплексная амплитуда плотности тока слоя катушки;  $\underline{E}(x)$  – комплексная амплитуда напряженности электрического поля;  $\underline{I}$  – комплексная амплитуда тока;  $p$  – параметр, определяющий гармонический характер электромагнитного процесса;  $a$ ,  $h$  – толщина и высота сечения слоя.

Результаты расчета модуля комплексной величины плотности тока, соответствующие соотношению (2), приведены в виде двух графиков на рис. 4.

На рис. 4,а приведен график зависимости плотности тока по толщине ленты  $\delta = |\underline{\delta}(x)|$ , построенный по результатам расчета в математической системе Maple V для участка  $0 \leq x \leq a$ . График представлен множеством кусочно-линейных отрезков. Поскольку при расчетах в математической системе Maple V применяется метод конечных элементов, при малых величинах толщины ленты проявляется дискретный характер результатов расчета для отдельных конечных элементов, чем объясняется ступенчатый характер этой зависимости. На рис. 4,б показана сглаженная кривая этой зависимости, которая качественно совпадает с зависимостью, приведенной в [12].

С учетом зависимости плотности тока на рис. 4,б и попарного влияния слоев катушки на рис. 3 построены качественные зависимости, характеризующие распределение плотности тока по слоям катушки.

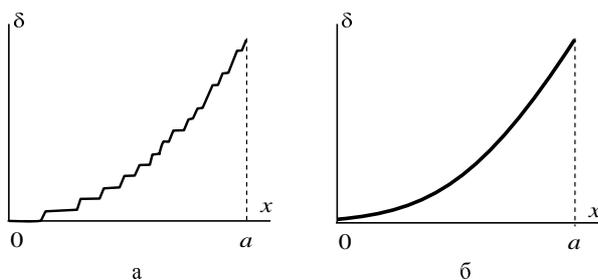


Рис. 4

В случае, когда толщина ленты  $a$  и расстояние  $l_\delta$  между ее слоями, определяемое соотношением (1), сравнимы по величине, в полной мере проявляется эффект близости. В этом случае напряженность электрического поля определяется соотношением [5]:

$$\underline{E}(x) = -\frac{Ip}{h\gamma(e^{2pa} - 1)} \left\{ e^{p \left[ 2a - \left( x - \frac{l_\delta}{2} \right) \right]} + e^{p \left( x - \frac{l_\delta}{2} \right)} \right\}. \quad (3)$$

При подстановке выражения для напряженности электрического поля (3) в соотношение (2) может быть получена величина комплексной амплитуды плотности тока в одном из слоев. В качественном отношении величина этой плотности тока характеризует эффект близости в направлении толщины слоев. Расчеты показывают, что характер зависимости плотности тока в направлении координаты толщины слоя остается таким же, как и на рис. 4,б. Отличия связаны с начальной и конечной величиной плотности тока на краях слоя, которые зависят от расстояния между слоями. В свою очередь, как было показано ранее, эта величина зависит от коэффициента заполнения катушки.

На рис. 3 в нижней части каждого слоя условно показаны кривые, характеризующие распределения плотности тока при наличии эффекта близости пар соседних слоев. Как видно на рис. 3, эффект близости проявляется только у крайних слоев катушки, а в средних слоях плотности тока выравниваются. Практическое значение имеет положение о том, что с увеличением числа витков катушки расстояние между слоями уменьшается, а плотности токов – увеличиваются. Вследствие этого ожидается и увеличение электродинамической силы отброса диска индукционно-динамического привода. Для окончательного заключения требуется проведение экспериментальных исследований, подтверждающих это положение.

#### ВЫВОДЫ

1. Выполнена оценка коэффициента заполнения при изготовлении витой катушки из ленты. При увеличении количества витков катушки коэффициент заполнения увеличивается, и в этой связи рекомендуется выполнять катушку многослойной.

2. Проведена качественная оценка распределения плотности тока по слоям катушки с учетом эффекта близости. Как показывает анализ, с увеличением коэффициента заполнения выравнивается плотность тока по сечению ленты.

3. Установлено, что эффект близости в многослойной витой катушке проявляется только у крайних слоев катушки, а в средних слоях происходит выравнивание плотности тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Серeda А.Г. Оптимизация индукционно-динамического расцепителя с целью повышения токоограничивающей способности быстродействующих автоматических выключателей: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Харьков 2001. – 20 с.
2. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 11 с.
3. Балтаханов А.М. Расчет электромагнитных и электромеханических процессов в индукционно-динамических системах / Балтаханов А.М., Бондалетов В.Н. // Электричество. – 1981. – №2. – С. 64-67.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.
5. Михайлов В.М. О распространении импульсного электромагнитного поля в системе "индуктор-обрабатываемая деталь" // Вестник Харьков. политехн. ин-та "Магнитно-импульсная обработка металлов". – 1971. – № 53. – Вып. № 1. – С. 15 – 23.
6. Михайлов В.М. Анализ электромагнитных процессов в разрядном контуре конденсатора с учетом поверхностного эффекта // Теоретическая электротехника. – 1974. – Вып. № 17. – С. 74 – 80.
7. Витков М.Г. Проникновение импульсного магнитного поля внутрь цилиндрического экрана // Журнал технической физики. – 1965. – Том 35. – Вып. № 3. – С. 410 – 413.
8. Подольцев А.Д., Пигнастый С.С. Влияние скин-эффекта на энергетические показатели импульсного безжелезного трансформатора // Электричество. – 1985. – № 7. – С. 56 – 59.
9. Чабан В.И. Расчет переходного нелинейного скин-эффекта // Известия ВУЗов. – Энергетика – 1974. – № 10. – С. 24 – 30.
10. Рыгов С.М. Расчет скин-эффекта методом возмущений // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1940. – Том 10. – Вып. № 2. – С. 180-189.
11. Новгородцев А.Б., Шнеерсон Г.А. Переходные процессы и электродинамические усилия в системе соленоид-замкнутый экран // Труды Ленинград. политехн. ин-та. – 1966. – № 273. – С. 139 – 151.
12. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.: Энергия, 1968. – 488 с.

Поступила 31.03.2009

Литвиненко Виктория Владимировна, аспирант  
 Национальный технический университет  
 "Харьковский политехнический институт"  
 кафедра "Электрические аппараты"  
 ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина, 61002  
 тел. (057) 707-68-64, e-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua