

## МЕТОД РАСЧЕТА УСЛОВИЙ НА ЗАЖИМАХ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ МОМЕНТА

КАРАУЛОВ В.Н., канд. техн. наук, ГРОМОВ А.К., канд. техн. наук

Предлагается метод расчета зависимости питающего напряжения от углового положения ротора  $U=f(\gamma)$ , обеспечивающей заданный вид характеристики  $M=f(\gamma)$  – зависимости электромагнитного момента от углового положения ротора. Напряжение, питающее рабочую фазу вентильного индукторно-реактивного двигателя, рассчитывается для установившегося режима работы с постоянной частотой вращения, в том числе и с частотой, равной нулю. Зависимость  $M=f(\gamma)$  рассчитывается с учетом парной коммутации фаз на части периода работы одной фазы. Учитываются нелинейность магнитной цепи двигателя и двусторонняя зубчатость; величина момента определяется по изменению энергии магнитного поля в зазоре.

Вентильные индукторно-реактивные двигатели (ВИРД) применяют в управляемых приводах. Обобщенная структурная схема ВИРД представлена на рис. 1. Поперечное сечение трехфазного ВИРД показано на рис. 2. Фазы состоят из двух катушек, размещенных

на диаметрально расположенных зубцах статора. Фазы поочередно питаются импульсами напряжения от вентильного коммутатора.



Рис. 1

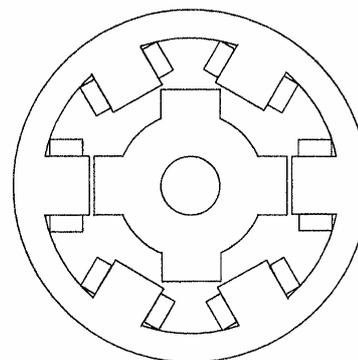


Рис. 2

При вращении ротора происходит смена работающих фаз. Ток в рабочей фазе нарастает после подачи напряжения на фазу; перед отключением фазы ток в ней уменьшается за счет подачи отрицательного напряжения. Скорости изменения токов зависят от частоты вращения ротора. В результате непостоянства токов изменяется величина рабочего магнитного потока в зазоре. Электромагнитный момент в ВИРД зависит от величины потока и от взаимного положения зубцов статора и ротора. Особенностью ВИРД является зависимость величины электромагнитного момента  $M$  от положения ротора – угла  $\gamma$  между взаимодействующими зубцами статора и ротора.

На рис. 3. показана зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора на интервале работы одной фазы. Изменение момента соответствует пусковому режиму, когда частота вращения ротора равна нулю и ток в рабочей фазе поддерживается постоянным. Точки пересечения зависимостей моментов, создаваемых отдельными фазами, от угла поворота определяют минимальный пусковой момент. При номинальной частоте вращения ротора пульсация результирующего момента увеличивается вследствие изменения токов в фазах.

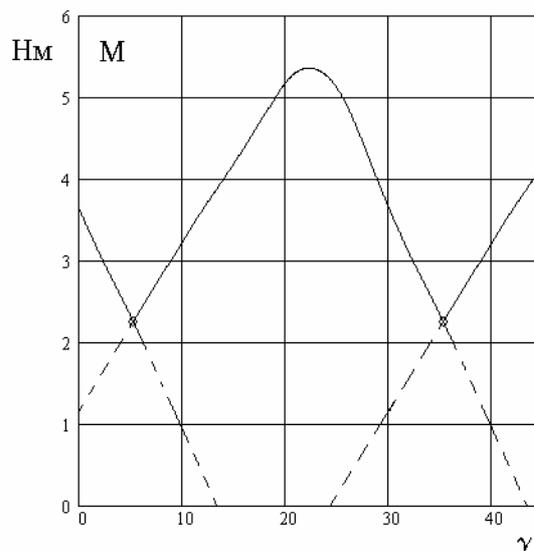


Рис.3

В ряде приводов необходимо либо постоянство момента при любом положении ротора, либо должна быть обеспечена заданная зависимость величины момента от положения ротора. Указанные свойства могут быть обеспечены управлением питанием машины. Поскольку вентильный двигатель питается от управляемого преобразователя частоты, то возможно регулирование мгновенной величины питающего напряжения. Регулированием напряжения можно обеспечить необходимую величину мгновенного тока в фазе, при которой образуется требуемая величина магнитного потока и вращающего момента. Поэтому необходима разработка метода расчета формы питающего напряжения, обеспечивающей требуемый закон изменения электромагнитного момента ВИРД.

Мгновенная величина электромагнитного момента двигателя зависит от положения ротора и величины рабочего магнитного потока в зазоре. Момент может быть рассчитан, как это принято в предлагаемом методе, по приращению магнитной энергии в зазоре в условиях виртуального перемещения ротора при постоянном потокоотсцеплении рабочей фазы:

$$M(\gamma) = - \frac{dW_{\delta}(\gamma)}{d\gamma} \Big|_{\Phi(\gamma)=const}, \quad (1)$$

где  $\Phi(\gamma)$  – поток в зазоре между взаимодействующими зубцами статора и ротора;  $W_{\delta}(\gamma)$  – магнитная энергия в зазоре;  $\gamma$  – угловая координата поворота ротора. Производная в (1) заменяется отношением приращений магнитной энергии и угловой координаты.

Энергия магнитного поля в зазоре

$$W_{\delta}(\gamma) = \frac{\Phi(\gamma)^2 \cdot R_{\delta}(\gamma)}{2}, \quad (2)$$

где  $R_{\delta}(\gamma)$  – магнитное сопротивление зазора между взаимодействующими зубцами статора и ротора. Сопротивление зазора можно рассчитать численно или приближенным численно-аналитическим методом, применяемым при расчетах электрических машин методом проводимостей зубцовых контуров [1]. Приращение магнитной энергии в зазоре при виртуальном перемещении ротора

$$\Delta W_{\delta}(\gamma) = \frac{\Phi(\gamma)^2 \cdot \Delta R_{\delta}(\gamma)}{2}. \quad (3)$$

В соответствии с уравнениями (1-3) магнитный поток в зазоре, обеспечивающий заданную величину электромагнитного момента двигателя,

$$\Phi(\gamma) = \sqrt{\frac{M(\gamma) \cdot 2 \cdot \Delta \gamma}{\Delta R_{\delta}(\gamma)}}. \quad (4)$$

Мгновенный ток в рабочей фазе рассчитывается по закону полного тока:

$$i(\gamma) = \frac{\sum F(\Phi(\gamma))}{2 \cdot w}, \quad (5)$$

где  $F(\Phi(\gamma))$  – падение магнитного напряжения в участках магнитной цепи (в зазоре, в зубцах и в участках ярем статора и ротора);  $2 \cdot w$  – число витков в катушках фазы.

Мгновенное напряжение, обеспечивающее необходимую величину тока в фазе, может быть определено уравнением

$$u(\gamma) = i(\gamma) \cdot r + L(i, \gamma) \cdot \Omega \cdot \frac{\Delta i(\gamma)}{\Delta \gamma} + i(\gamma) \cdot \Omega \cdot \frac{\Delta L(\gamma)}{\Delta \gamma}, \quad (6)$$

где  $L(i, \gamma) = \frac{\Phi(\gamma) \cdot W}{i(\gamma)}$  – мгновенная индуктивность фазы,

зависящая от тока (поскольку учитывается насыщение магнитной цепи) и положения ротора  $\gamma$ . Зависимость индуктивности от угла поворота ротора  $L=f(i, \gamma)$  может быть рассчитана различными методами, в том числе с помощью схемы замещения магнитной цепи.

Вычисленное по (6) напряжение должно обеспечить требуемый закон изменения электромагнитного момента ВИРД.

Рассчитан электромагнитный момент ВИРД, имеющего следующие данные: частота вращения 5000 об/мин.; мощность 1 кВт; число фаз –3; соотношение зубцов статора и ротора 6/4.

На рис. 4. показана зависимость индуктивности от тока в фазе и угла поворота ротора  $L=f(i, \gamma)$ .

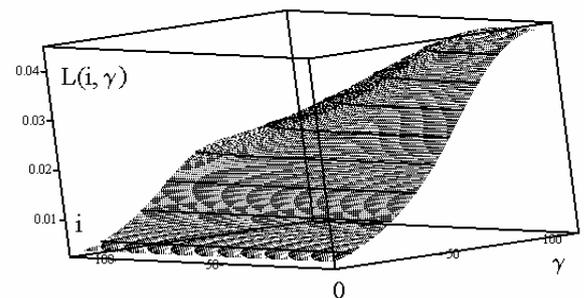


Рис. 4

На рис. 5 и 6 представлены зависимости электромагнитного момента ВИРД на интервале работы фазы. На рис. 5 представлено изменение электромагнитного момента при питании двигателя напряжением, имеющим постоянное значение на рабочем интервале.

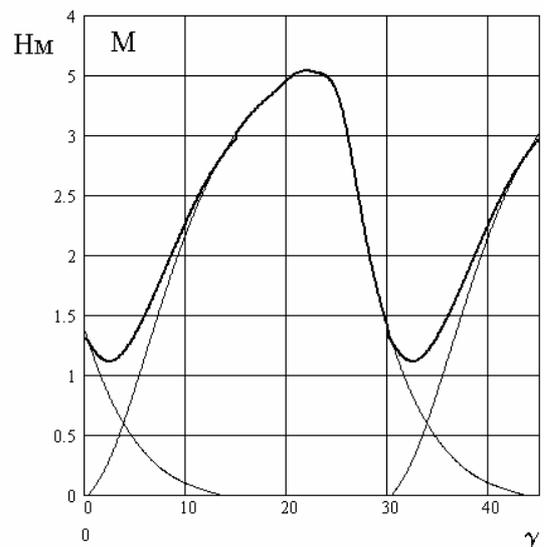


Рис. 5

При питании ВИРД напряжением, изменяющимся по закону (6), обеспечивается требуемое постоянство электромагнитного момента (рис. 6).

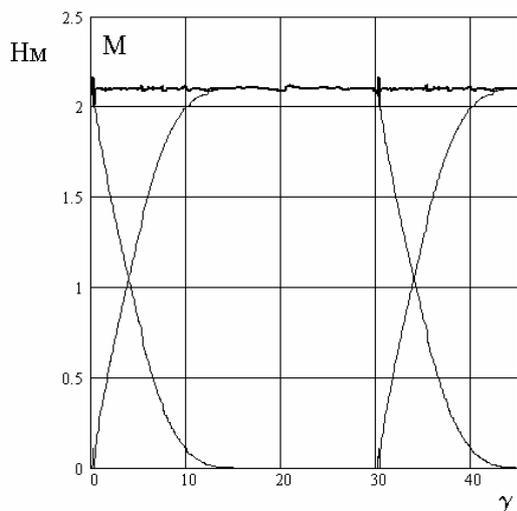


Рис. 6

Соответствующие кривые питающего напряжения и тока в фазе приведены на рис. 7 и 8.

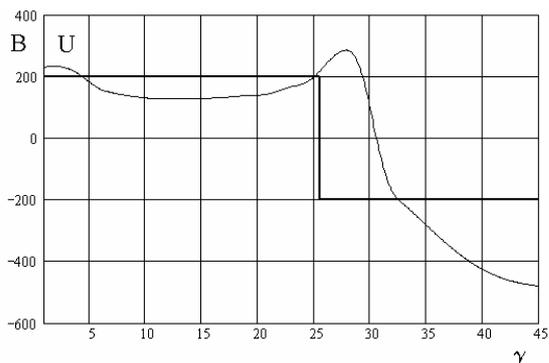


Рис. 7

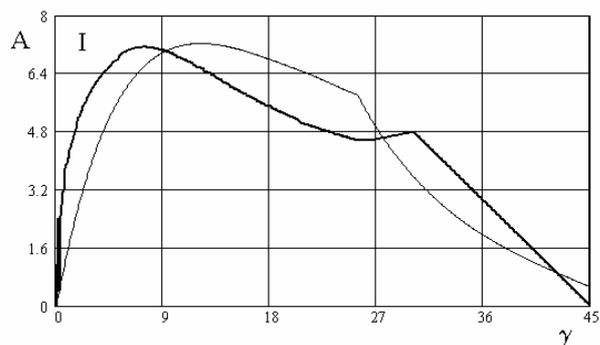


Рис. 8

Кривые напряжения и тока, показанные жирной линией, получены при питании двигателя, обеспечивающем среднее значение момента; показанные тонкой линией, получены при питании двигателя, обеспечивающем постоянное значение момента.

Результаты проведенных расчетных исследований позволяют сделать следующие заключения:

1. Разработанная на кафедре электромеханики ИГЭУ методика электромагнитного расчета ВИРД позволяет успешно проектировать преобразователи указанного типа и анализировать электромеханические процессы в них.
2. Предлагаемый метод позволяет на этапе проектирования оценивать рабочие свойства управляемого ВИРД и необходимые для их реализации условия на зажимах – формы тока и питающего напряжения.

#### Список литературы

1. **Универсальный** метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов и др.; Под ред. А.В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
2. **Моделирование** электромагнитных процессов в вентильно-индукторном преобразователе энергии / В.Н. Караулов, А.К. Громов // «Высоковольтные техника и электротехнология»: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3. – Иваново, 2004. – С. 54–58.