

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»

Академия электротехнических наук Российской Федерации

## **СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Международной научно-технической конференции

# **«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**

(XVI Бенардосовские чтения)

*К 130-летию изобретения электродуговой сварки  
Н.Н. Бенардосом*

**1-3 июня**

I том

**Электроэнергетика**

Иваново 2011

В I томе сборника научно-технической конференции отражены результаты научных исследований в области теории и практики электротехники и электротехнологии; электроэнергетических систем; рассмотрены вопросы надежности, эффективности и диагностики электрооборудования станций и энергосистем; вопросы техногенной безопасности в энергетике.

Редакционная коллегия:

**Тарарыкин С.В.**, ректор, д.т.н., профессор, - председатель  
**Тютиков В.В.**, проректор по НР, д.т.н., профессор,  
**Мошкарин А.В.**, зав. каф. ТЭС, д.т.н., профессор  
**Назарычев А.Н.**, зав. каф. ЭСДЭ, д.т.н., профессор  
**Митькин Ю.А.**, зав. каф. ТЭВН, д.т.н., профессор  
**Полетаев В.А.**, зав. каф. ТАМ, д.т.н., профессор  
**Косяков С.В.**, зав. каф. ПОКС, д.т.н., профессор  
**Колибаба В.И.**, зав. каф. экономики и организации предприятия  
**Клюнина С.В.**, нач. УИУНЛ

ISBN 978-5-89482-726-1  
ный

© □ ГОУВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина», 2011.

УДК 621.313

В.Г. БЕЛОНОГОВ, А. Н. ГОЛУБЕВ, д.т.н., профессор,  
В.А. МАРТЫНОВ, д.т.н., профессор,  
В.Д. КАРАЧЕВ, студент  
(ИГЭУ)

## Моделирование $m$ -фазного синхронного электропривода с использованием комплекса EICUT

Одной из актуальных задач, возникающих при создании современных электроприводов (ЭП) переменного тока, является снижение уровня шумов и вибраций исполнительного двигателя. Помимо механических составляющих, шумы и вибрации обусловлены магнитными силами, изменяющимися во времени и пространстве [1] и являющимися функциями конфигурации магнитного поля в воздушном зазоре машины, в частности синхронного двигателя (СД)

Эффективным способом улучшения спектрального состава поля в зазоре двигателя переменного тока является переход на исполнение его статорной обмотки с увеличенным числом фаз, что не вызывает технических проблем при использовании автономного инвертора и определяет дополнительное улучшение целого спектра других технико-экономических характеристик ЭП [2]. Одним из подходов к всестороннему исследованию данного вопроса является имитационное моделирование на ЭВМ. Исследование виброшумовых характеристик синхронного ЭП на ЭВМ требует наличия корректного математического описания  $m$ -фазного СД с произвольной формой питающих напряжений. В данной работе для расчета поля в зазоре многофазного СД был использован программный комплекс EICut, позволяющий достаточно удобно на основе заложенных в него средств учитывать реальную геометрию рабочих частей машины. При этом моделирование самой системы автоматического управления ЭП осуществляется в среде MatLAB (пакет SimuLink).

Уравнения переменных состояния для всех фаз СД в соответствии со вторым законом Кирхгофа могут быть представлены следующим образом:

$$\frac{d[\psi]}{dt} = [u] - [R][i], \quad (1)$$

где  $[\psi] = [L][i]$  - матрица-столбец мгновенных потокосцеплений;  $[u]$  - матрица-столбец мгновенных напряжений фаз, определяемых САУ синхронным ЭП [2];  $[R]$  - матрица активных сопротивлений фаз;  $[i]$  - матрица-столбец мгновенных токов фаз [3].

С учетом нелинейности характеристики магнитопровода запишем:

$$\frac{d[\psi]}{dt} = [L] \frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [i],$$

откуда на основании (1)

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} \left( [U] - [R][i] - \frac{d[L]}{dt} [i] \right),$$

или, учитывая, что

$$\frac{d[L]}{dt} = \frac{d[L]d\alpha}{d\alpha dt} = \omega \frac{d[L]}{d\alpha},$$

где  $\alpha$  - угол поворота ротора,  $\omega = d\alpha/dt$  – угловая частота его вращения,

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} \left( [U] - [R][i] - \omega \frac{d[L]}{d\alpha} [i] \right) \quad (2)$$

В уравнении (2)

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \dots & M_{2n} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & \dots & M_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \dots & L_n \end{bmatrix}.$$

Алгоритм расчета следующий.

1. Осуществляется разбиение элементов модели СД в среде EICut на блоки с целью присвоения каждому из них итерационно рассчитываемого значения относительной магнитной проницаемости  $\mu$ , после чего для всех зон задаются значения  $\mu$  на начальном участке зависимости  $B(H)$ .

2. Задаются поочередно малые (соответствующие начальному участку зависимости  $B(H)$ ) значения токов матрицы  $[i]$  и поочередно определяются с помощью средств EICut соответствующие им столбцы матрицы  $[L]$ , учитывая при этом, что  $M_{ik} = M_{ki}$ .

3. Для полученной матрицы  $[L]$  при  $[I(0)] = [0]$  интегрируется уравнение (2), в результате чего определяются элементы матрицы  $[i]$  на 1-м шаге расчета.

4. Для полученных токов  $[i]$  итерационным методом определяются значения  $\mu$  во всех зонах модели СД, созданной в среде EICut. Это реализуется на основе проверки соответствия значений относительной магнитной проницаемости  $\mu$  и магнитной напряженности  $H$  с использованием магнитной характеристики  $\mu(H)$ .

5. Для найденных значений  $\mu$  производится новый расчет элементов матрицы  $[L]$ .

6. Осуществляется поворот ротора на некоторый заданный угол  $\Delta\alpha$  и для значений токов  $[i]$  п. 4 алгоритма определяются по столбцам элементы матрицы  $[L^{\Delta\alpha}]$  для этого угла. Тогда численное значение производной в (2)

$$\frac{d[L]}{d\alpha} \approx \frac{[L^{\Delta\alpha}] - [L]}{\Delta\alpha}.$$

7. Интегрируется уравнение (2), в результате чего определяются новые значения токов  $[i]$ , и так далее.

В случае  $m$ -фазного СД с постоянными магнитами для потокосцеплений фаз статора можно записать:

$$[\psi] = [L][i] + [\psi_n],$$

где  $[\psi_n]$  - составляющие потокосцеплений от постоянных магнитов.

Тогда уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{d[\psi]}{dt} = [L] \frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [i] + \frac{d[\psi_n]}{dt} = [u] - [R][i],$$

откуда

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} \left( [U] - [R][i] - \omega \frac{d[L]}{d\alpha} [i] - \omega \frac{d[\psi_n]}{d\alpha} \right),$$

где  $d[\psi]/d\alpha$  определяется при  $\mu = const$ .

Приведенные выше уравнения дополняются уравнением движения

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

определяющим угол поворота ротора СД.

#### Литература

1. **Ананьев С.С., Голубев А.Н.** Асинхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками: научное издание/ ГОУВПО ИГЭУ. Иваново, 2009. – 160 с.

2. **Голубев А.Н., Лапин А.А.** Многофазный синхронный регулируемый электропривод: научное издание/ ГОУВПО ИГЭУ. Иваново, 2008. – 156 с.

3. **Мартынов В.А.** Современные модели и методы расчета нелинейных электромеханических устройств: научное издание/ ГОУВПО ИГЭУ. - Иваново, 2000. – 140 с.