ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 160 1966

ВОПРОСЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОМАШИННЫМ УСИЛИТЕЛЯМ (БЭМУ) ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Разработка вопросов общей теории электрических машин позволяет вести сравнительную оценку различных классов электрических машин и открывает перспективу для развития новых электрических машин.

Совмещенные электрические машины типа преобразователей, усилителей представляют собой специфичный класс машин, и рассмотрение их с позиций общей теории электрических машин крайне необходимо. Общий подход к ним, по нашему мнению, может быть разработан на основе теории электромагнитных явлений Максвелла и уравнений Лагранжа [1, 2, 3]. При этом непосредственно учитываются физические свойства машин.

При выполнении условий совмещения каждый каскад можно рассматривать как отдельную машину с последующим установлением связи между отдельными каскадами. Уравнения Лагранжа-Максвелла позволяют рассматривать каждую из обмоток в отдельности и записать для нее уравнения Лагранжа второго рода для электромеханических и электродвижущих сил. В общем же в каждом каскаде совмещенной машины для каждой из обмоток записываются уравнения электродвижущих сил и электрических мощностей и уравнения электромеханических сил и электромеханических мощностей с учетом взаимодействия обмоток статора и ротора.

В конечном виде эти уравнения записываются так:

1. Уравнения э.д.с.

$$e_к = i_к r_к + \frac{d\,(l_к\, i_к)}{dt} + \sum \frac{d\,(m_{ка}\, i_а)}{dt}. \tag{1}$$

2. Уравнения электрических мощностей

$$P_{эл} = e_к\, i_к = i_к^2\, r_к + i_к \frac{d\,(l_к\, i_к)}{dt} + i_к \sum \frac{d\,(m_{ка}\, i_а)}{dt}. \tag{2}$$

3. Уравнения электромеханических сил

$$M_{эм} = -\frac{1}{2}\, i_а\, i_в\, \frac{dm_{ав}}{d\alpha}. \tag{3}$$

4. Уравнения электромеханических мощностей

$$P_{эм} = -\frac{1}{2}\, i_а\, i_в\, \frac{dm_{ав}}{dt}. \tag{4}$$

Обозначения в формулах:

$e_к$ — обобщенная э. д. с.

$M_{эм}$ — обобщенная электромеханическая сила,

α — геометрическая координата.

$r_к$, $l_к$, $m_{ав}$, $i_а$, $i_в$, $i_к$ — активное сопротивление, индуктивности, взаимоиндуктивности и токи рассматриваемых обмоток.

В неявнополюсных машинах индуктивности и взаимоиндуктивности между фазами можно считать постоянными, а изменяются лишь взаимоиндуктивности между обмотками статора и ротора.

Из системы уравнений (1)—(4) можно определить токи, мощности, моменты и установить, таким образом, связь между отдельными каскадами.

Проведем определение необходимых величин применительно к БЭМУ постоянного тока и переменного с фиксированной частотой, схема и принцип работы которых поясняются рис. 1.

На рисунке приняты обозначения:

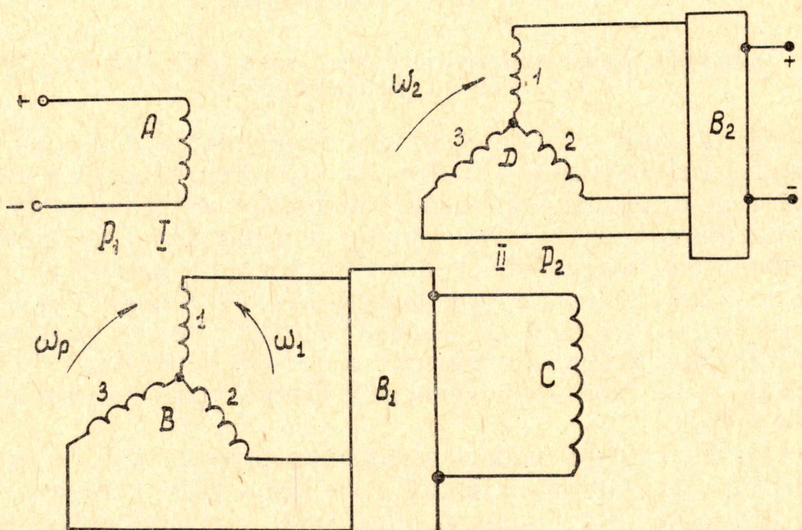

Рис. 1. Схема БЭМУ постоянного тока.

A — обмотка управления. Расположена на статоре и питается постоянным током;

B, C, — обмотки ротора первого и второго каскадов усилителя;

D — выходная обмотка. Расположена на статоре.

B_2 и B_1 — выпрямительные блоки в роторе и на статоре. При отсутствии B_2 на выходе получается переменный ток фиксированной частоты.

Цифрами 1, 2, 3 обозначен порядок чередования фаз в трехрядных обмотках ротора и статора.

$\omega_р$ — угловая скорость вращения ротора,

ω_1; ω_2 — угловые скорости вращения полей в обмотках B и Д.

Стрелками показаны направления вращения ротора и полей в I и II каскадах.

P_1 и P_2 — числа пар полюсов в I и II каскадах.

Напишем уравнения равновесия э.д.с. для обмоток A, B, C, и D. В самом общем виде они запишутся следующими выражениями.

Для обмотки A

$$U_A = i_A r_A + \frac{d(L_A i_A)}{dt} + \frac{d(m_{1AB} i_{1B})}{dt} + \frac{d(m_{2AB} i_{2B})}{dt} + \frac{d(m_{3AB} i_{3B})}{dt}. \tag{5}$$

Для первой фазы обмотки B

$$O = i_{1B} r_B + \frac{d(l_B i_{1B})}{dt} - \frac{d(M_B i_{2B})}{dt} - \frac{d(M_B i_{3B})}{dt} +$$

$$\frac{d(m_{1AB} i_A)}{dt} = i_{1B} r_B + 1{,}5 L_B \frac{di_{1B}}{dt} + i_A \frac{dm_{1AB}}{dt} + m_{1AB} \frac{di_A}{dt}. \tag{6}$$

Для обмотки C

$$U_C = i_C r_C + \frac{d(L_C i_C)}{dt} + \frac{d(m_{C1D} i_{1D})}{dt} + \frac{d(m_{C2D} i_{2D})}{dt} +$$

$$+ \frac{d(m_{C3D} i_{3D})}{dt}. \tag{7}$$

Для обмотки D

$$U_{1D} = i_{1D} r_D + \frac{d(L_D i_{1D})}{dt} - \frac{d(M_D i_{2D})}{dt} - \frac{d(M_D i_{3D})}{dt} +$$

$$+ \frac{d(m_{1DC} i_C)}{dt} = i_{1D} r_D + 1{,}5 L_D \frac{d i_{1D}}{dt} + i_C \frac{dm_{1CD}}{dt} + m_{1DC} \frac{di_C}{dt}. \tag{8}$$

Обозначения в формулах:

i_A, i_B, i_C, i_{1D} — мгновенные значения токов в обмотках A, B, C, и D.

$r_A, r_B, r_C, r_D, L_A, L_B, L_C, L_D,$ — активные сопротивления и индуктивности обмоток A, B, C, и D.

M_D, M_B — взаимоиндуктивности между фазами обмоток B и D. Буквой m с соответствующими индексами обозначены переменные взаимоиндуктивности между обмотками статора и ротора.

U_A — постоянное напряжение, приложенное к обмотке управления.

U_{C1}, U_D — мгновенные значения напряжений в обмотке C и фазе обмотки D.

По [4] принимаем $-M_B = 0{,}5\, L_B$, $-M_D = 0{,}5\, L_D$.

Уравнения (5)—(8) написаны для мгновенных значений и действительны для любого установившегося или переходного режима. Рассмотрим пока лишь установившийся режим работы и будем учитывать только основные гармонические.

В этом случае изменения токов и взаимоиндуктивностей будут определяться уравнениями:

$$i_{1B} = I_{mB} \sin(\omega_1 t + \alpha_1); \qquad m_{1AB} = M_{AB} \sin \omega_1 t;$$

$$i_{2B} = I_{mB} \sin\left(\omega_1 t + \alpha_1 + \frac{2\pi}{3}\right); \qquad m_{2AB} = M_{AB} \sin\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$i_{3B} = I_{mB} \sin\left(\omega_1 t + \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}\right); \qquad m_{3AB} = M_{AB} \sin\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right); \tag{9}$$

$$m_{DC1} = M_{CD} \sin \omega_2 t; \qquad i_{1D} = I_{mD} \sin(\omega_2 t + \alpha_2);$$

$$m_{C2D} = M_{CD} \sin\left(\omega_2 t + \frac{2\pi}{3}\right); \qquad i_{2D} = I_{mD} \sin\left(\omega_2 t + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$m_{C3D} = M_{CD} \sin\left(\omega_2 t - \frac{2\pi}{3}\right); \qquad i_{3D} = I_{mD} \sin\left(\omega_2 t + \alpha_2 + \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$m_{C1D} = m_{1DC},$$

$$m_{C2D} = m_{2DC},$$

$$m_{C3D} = m_{3DC}.$$

Для установившегося режима (5) примет вид:

$$U_A = I_A r_A, \qquad (10)$$

$$I_A = \frac{U_A}{r_A}.$$

Уравнение (6)

$$0 = I_{mB} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) r_B + 1{,}5 L_B I_{mB} \omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + $$
$$+ I_A \omega_1 M_{AB} \cos \omega_1 t_1. \qquad (11)$$

Откуда

$$I_{mB} = \frac{-I_A \omega M_{AB} \cos \omega_1 t}{\sin(\omega_1 t + \alpha_1) r_B + 1{,}5 L_B \omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1)}. \qquad (12)$$

Уравнение (7)

$$U_C = I_C r_C \text{ и } I_C = \frac{U_C}{r_C}, \qquad (13)$$

где U_C и I_C — значения выпрямленных напряжения и тока.

Уравнение (8)

$$U_{mD} \sin \omega_2 t = I_{mD} [\sin(\omega_2 t + \alpha_2) r_D + 1{,}5 L_D \omega_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2)] +$$
$$+ I_C \omega_2 M_{CD} \cos \omega_2 t, , \qquad (14)$$

откуда

$$I_{mD} = \frac{U_{mD} \sin \omega_2 t}{\sin(\omega_2 t + \alpha_2) r_D + 1{,}5 L_D \omega^2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2)} -$$

$$\frac{I_C \omega_2 M_{CD} \cos \omega_2 t}{\sin(\omega_2 t + \alpha_2) r_D + 1{,}5 L_D \omega_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2)} \qquad (15)$$

При наличии выпрямительного блока B_2 учитываются выпрямленные выходные ток и напряжение.

Необходимые э.д.с. для обмоток B и D

$$e_{1B} = I_A \omega_1 M_{AB} \cos \omega_1 t_1,$$
$$e_{1D} = I_C \omega_2 M_{CD} \cos \omega_2 t, \qquad (16)$$

Электрические мощности обмоток A и C и мощности, приходящиеся на фазу обмоток B и D

$$P_{эл} = I_A^2\ r,$$
$$P_{эл\ 1B} = i_{1B} e_{1B} = I_{mB} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) I_A \omega_1 M_{AB} \cos \omega_1 t. \qquad (17)$$
$$P_{эл\ c} = I_C^2 r_C;$$
$$P_{эл\ 1D} = i_{1D} e_{1D} = I_{mD} \sin(\omega_2 t + \alpha_2) \cdot I_C \omega_2 M_{Cd} \cos \omega_2 t.$$

Электромеханические мощности на фазу для I и II каскадов

$$P_{эм.1AB} = -\frac{1}{2} I_A I_{mB} M_{AB}\ \omega_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \cos \omega_1 t;,$$

$$P_{эм.C1D} = -\frac{1}{2} I_C I_{mD} M_{CD}\ \omega_2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) \cos \omega_2 t.;, \qquad (18)$$

Вращающие моменты для I и II каскадов

$$M_{эм.1AB} = -\frac{1}{2} I_A I_{mB} M_{AB} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \cos \omega_1 t,$$

$$M_{эм.C1D} = -\frac{1}{2} I_C I_{mD} M_{CD}\ \sin(\omega_2 t + \alpha_2) \cos \omega_2 t \qquad (19)$$

Таким образом, на основании общих уравнений Лагранжа-Максвелла определяются все необходимые данные совмещенной электрической машины типа БЭМУ постоянного или переменного тока. По ним может быть сделан необходимый анализ всех режимов работы усилителя.

В усилителях, как правило, для компенсации реакции якоря имеются обмотки обратной связи. Создаваемые ими токи, мощности и моменты учитываются аналогичным образом.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Каплянский. Введение в общую теорию электрических машин, ГЭИ, 1941.
2. В. В. Базилевич. К вопросу общей теории электрических машин, Электричество, № 21, 1930.
3. И. М. Садовский. Электродинамика коллекторных электрических машин. Электричество, № 4, 1949.
4. Г. Н. Петров. Электрические машины ГЭИ, 1963.
5. Б. Адкинс. Общая теория электрических машин, ГЭИ, 1960.
6. М. И. Алябьев. Общая теория судовых электрических машин, Изд. Судостроение, 1965.