

БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ (БЭМУ)

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Э. Н. ПОДБОРСКИЙ, Э. Ф. ОБЕРГАН

(Рекомендовано семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники.)

В решении проблемы автоматизации важнейшая роль принадлежит электрофицированным системам автоматического регулирования, применяемым как в промышленности, так и в энергетических установках. Одним из основных элементов системы авторегулирования являются усилители, позволяющие с помощью малых мощностей управлять крупными электрическими машинами. С широким развитием разнообразных систем автоматического регулирования большое распространение получили коллекторные электромашинные усилители. Имея большой коэффициент усиления, хорошее быстродействие, обладая хорошими технико-экономическими данными, коллекторные ЭМУ широко применяются в силовом электроприводе.

Однако коллекторные усилители из-за наличия скользящих контактов недостаточно надежны в работе, требуют тщательного ухода и наладки коммутации. В условиях разреженного пространства, в пыльных помещениях работа щеточного аппарата особенно сильно затруднена, и работа машины может стать невозможной.

Крайне нежелательно, а в некоторых случаях недопустимо наличие щеточного контакта в усилителях, работающих в пожаро- и взрывоопасных помещениях, в угольных шахтах, в установках, где предъявляются жесткие требования к уровню радиопомех.

Указанным условиям эксплуатации наиболее полно соответствует применение бесколлекторных усилителей, которые не имеют скользящих контактов. Поэтому они не требуют тщательного ухода и более надежны в работе.

Следует отметить, что ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не освещены вопросы общей теории бесколлекторных усилителей и не дается методика их проектирования. В [1, 2] даются только возможные схемы этих усилителей, но нет никаких рекомендаций для их проектирования. Поэтому на кафедре электрических машин Томского политехнического института был спроектирован, изготовлен и исследован бесколлекторный электромашинный усилитель (БЭМУ) переменного тока фиксированной частоты.

$P = 4,2$ квт, $U = 220$ в, $n = 3000$ об/мин, $f = 100$ гц.

Принцип работы. Бесколлекторный усилитель представляет собой двухкаскадный одноякорный усилитель, во второй ступени которого используется возбуждение от тока якоря первой ступени. Обе ступени выполнены в соответствии с условиями совместимости двух

каскадов (ступеней) в одном магнитопроводе, которые будут изложены ниже. Принципиальная схема усилителя представлена на рис. 1.

Обозначения на рисунке:

- W_y — обмотка управления,
- W_{p1} — трехфазовая обмотка ротора с числом полюсов $2p_1$,
- W_{p2} — обмотка возбуждения второго каскада,
- W_s — выходная обмотка статора,
- W_k — компенсационная обмотка,
- R_n — реостат нагрузки,
- TT — трансформаторы тока.

Работу его можно пояснить следующим образом. При включении обмотки управления на постоянное напряжение U_y по ней течет ток управления, равный

$$I_y = \frac{U_y}{r_y}, \quad (1)$$

где r_y — омическое сопротивление обмотки управления. Ток управления создаст н. с. F_y , равную

$$F_y = I_y W_y, \quad (2)$$

где W_y — число последовательно соединенных витков обмотки управления.

Н. с. F_y создаст неподвижный в пространстве магнитный поток Φ_y с числом полюсов $2P_1 = 2$. Поскольку ротор усилителя вращается приводным двигателем со скоростью n , в трехфазной обмотке ротора первого каскада W_{p1} с числом полюсов $2P_1 = 2$ будет наводиться э. д. с. E_{p1} с частотой

$$f_{p1} = \frac{P_1 \cdot n}{60}. \quad (3)$$

Обмотка W_{p1} подключена к трехфазному выпрямителю B , собранному на полупроводниковых диодах.

Нагрузкой выпрямителя является обмотка ротора второй ступени W_{p2} с числом полюсов $2P_2 = 4$.

Выпрямленный постоянный ток I_{p2} , протекая по однофазной обмотке ротора W_{p2} , создаст н. с.

$$F_{p2} = I_{p2} W_{p2}. \quad (4)$$

Под действием F_{p2} возникает магнитный поток Φ_{p2} с числом полюсов $2P_2 = 4$, неподвижный относительно ротора. Вращаясь вместе с ро-

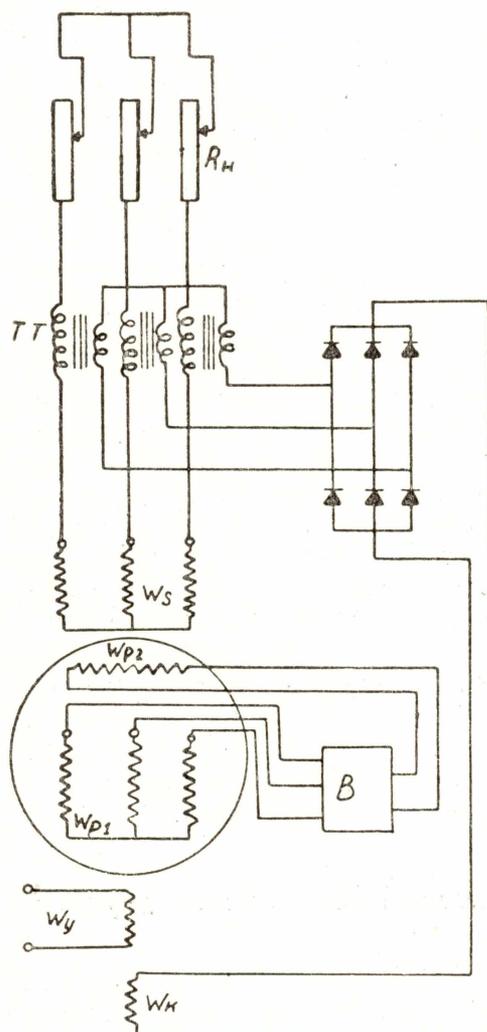


Рис. 1. Принципиальная схема бесколлекторного электромашинного усилителя с фиксированной частотой (БЭМУ).

тором относительно статора со скоростью n , этот поток наводит в витках выходной обмотки статора э. д. с. с частотой

$$f_s = \frac{P_2 \cdot n}{60}. \quad (5)$$

При включении выходной обмотки статора W_s на симметричную нагрузку по обмотке статора потечет ток нагрузки. Реакция якоря от тока нагрузки будет оказывать влияние на поток Φ_{p2} , но не будет влиять на поток обмотки управления при выполнении условия совместности двух каскадов в одном магнитопроводе.

С ростом тока нагрузки напряжение на выходе усилителя изменяется в зависимости от величины и характера нагрузки под влиянием реакции якоря выходной обмотки, падения напряжения в ее активном и реактивном сопротивлениях.

Для увеличения жесткости внешних характеристик БЭМУ применена положительная обратная связь по току нагрузки.

Первичные обмотки трансформаторов тока соединены последовательно с нагрузкой. Концы вторичных обмоток у них соединены звездой, а начала подключены к трехфазному выпрямителю, собранному по схеме Ларионова. На выход выпрямителя включена обмотка обратной связи, называемая в дальнейшем компенсационной. Она уложена в пазах статора по той же схеме, что и обмотка управления.

По компенсационной обмотке протекает постоянный ток, величина которого пропорциональна величине тока нагрузки, так как трансформаторы тока имеют ненасыщенную магнитную систему. Направление тока в компенсационной обмотке должно быть таким, чтобы ее н. с. была направлена согласно с н. с. управления. Прямо пропорционально росту тока нагрузки растет н. с. компенсационной обмотки и поток первого каскада.

Условия совместности двух каскадов БЭМУ в одном магнитопроводе

Принцип объединения двух электрических машин в одном магнитопроводе известен давно. Так, например, Р. Рихтером [3] было предложено несколько каскадных асинхронных двигателей, каждый из которых представляет собой то или иное сочетание двух асинхронных двигателей, совмещенных в одном магнитопроводе. Позднее вопросу совмещения двух электрических машин — асинхронного двигателя и асинхронного преобразователя — в одном магнитопроводе были посвящены работы [4, 5, 6]. В них отмечается, что выбор чисел пар полюсов и исполнение обмоток объединяемых электрических машин не произволен. Для совмещения обмоток двух электрических машин в одном магнитопроводе необходимо:

1. Чтобы между двумя обмотками отсутствовала индуктивная связь.
2. Чтобы сумма двух электромагнитных полей не создавала несимметричного поля, вызывающего односторонние магнитные притяжения и вибрации.

Рассмотрим применительно к БЭМУ условия, при которых между двумя обмотками, уложенными в одном магнитопроводе, отсутствует индуктивная связь.

В БЭМУ необходимо и достаточно, чтобы отсутствовала индуктивная связь между обмоткой управления и обмоткой возбуждения вто-

рого каскада. Однофазная обмотка управления БЭМУ может быть: сосредоточенной, распределенной и концентрической.

Вначале рассмотрим условие совместимости двух каскадов в одном магнитопроводе с сосредоточенной обмоткой управления.

При работе БЭМУ поток возбуждения второй ступени Φ_{p_2} будет вращаться вместе с ротором относительно статора, поэтому в обеих сторонах катушки управления будут наводиться э.д.с. Для БЭМУ необходимо, чтобы поток Φ_{p_2} не наводил э.д.с. в обмотке управления. Следовательно, сумма э.д.с. в обеих сторонах катушки управления должна быть равна нулю.

Если катушка управления выполнена с полным шагом по отношению к потоку Φ_{p_2} , то последний наведет в ней э.д.с. E_y ; если же шаг катушки управления отличается от полюсного деления τ_2 , то в обмотке управления W_y будет наводиться э.д.с.

$$E'_y = K'_y E_y, \quad (6)$$

где $K'_y = \sin \frac{\pi}{2} \frac{\tau_1}{\tau_2}$ — коэффициент укорочения шага обмотки управ-

ления, учитывающий уменьшение э.д.с. от потока Φ_{p_2} при сокращении шага обмотки;

τ_1 — полюсное деление первого каскада;

Z_s — число пазов статора;

$2P_1$ — число полюсов первого каскада;

$\tau_2 = \frac{Z_s}{2P_2}$ — полюсное деление второго каскада;

$2P_2$ — число полюсов второй ступени.

Из (6) видно, что обмотка управления не будет индуктивно связана с обмоткой W_{p_2} в том случае, если $K'_y = 0$, то есть

$$\sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2} = 0. \quad (7)$$

Это возможно в том случае, если

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \text{четному числу} \quad (8).$$

Если в выражение (8) подставить значения полюсных делений через числа пазов и пар полюсов, то получим

$$\frac{P_2}{P_1} = \text{четному числу}. \quad (9)$$

Таким образом, (9) представляет собой математическое выражение условия совместимости двух каскадов БЭМУ с сосредоточенной обмоткой управления.

При распределенной обмотке управления э.д.с. последней от потока Φ_{p_2} равна

$$E_y = E \cdot K_w, \quad (10)$$

где E — э.д.с. сосредоточенной обмотки шагом и с тем же числом витков, что и у распределенной.

$K_w = K_p K'_y$ — обмоточный коэффициент,

K_p — коэффициент распределения обмотки W_y для поля Φ_{p_2} .

Из (10) видно, что $E_y = 0$ при $K_w = 0$ или

$$K_w = K_p \cdot K'_y = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \sin \frac{\pi}{2} \frac{\tau_1}{\tau_2}, \quad (11)$$

где q — число пазов на полюс и фазу обмотки W_y ,
 α — угол сдвига между двумя соседними пазами в электрических градусах Φ_{p2} .

Выражение (11) будет равно нулю при

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \text{четному числу}, \quad (12)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \text{четному числу}.$$

Таким образом, (12) представляет собой математическое выражение условия совместимости двух каскадов БЭМУ с распределенной обмоткой управления.

В концентрической обмотке управления поток Φ_{p2} будет наводить э. д. с. в каждой катушке управления. Так как оси всех катушек концентрической обмотки совпадают, то э. д. с. всех катушек будут складываться алгебраически.

Допустим, в n — катушке с шагом, равным τ_2 , поток Φ_{p2} наводит э. д. с. $E_{ку}$, тогда в любой другой катушке будет наводиться э. д. с.

$$E'_{ку} = E_{ку} K'_{yn}. \quad (13)$$

Коэффициент укорочения шага для этой катушки равен

$$K'_y = \sin \frac{\pi}{2} \frac{Y_n}{\tau_2}, \quad (14)$$

где Y_n — шаг n катушки обмотки управления W_y . Причем шаг катушки следует подсчитывать от начала катушки к концу в одном направлении для всех катушек (например, в направлении вращения ротора).

Для БЭМУ необходимо, чтобы сумма э. д. с. всех катушек обмотки управления была равна нулю, т. е.

$$E_y = E_{ку} (K'_{y1} + K'_{y2} + \dots + K'_{yn}) = 0. \quad (15)$$

Из (15) видно, что это возможно только в том случае, если

$$K'_{y1} + K'_{y2} + \dots + K'_{yn} = 0 \quad (16)$$

или

$$\sum_1^n K'_y = 0, \quad (17)$$

где n — число катушек обмотки управления.

С учетом (15) выражение (17) примет вид

$$\sum \sin \frac{\pi}{2} \frac{Y_n}{\tau_2} = 0. \quad (18)$$

Таким образом, (18) представляет собой математическое выражение условия отсутствия индуктивной связи между отдельными каскадами БЭМУ при концентрической обмотке управления.

Оно позволяет очень просто определить, возможно ли осуществить тот или иной вариант БЭМУ. Например, определить, возможно ли изготовить БЭМУ при $Z_s=36$, $2P_2=4$, $2P_1=2$.

Обмотка управления концентрическая из четырнадцати катушек с шагами.

$$Y_n = 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31,$$

$$\tau_2 = \frac{Z_s}{2P_2} = \frac{36}{4} = 9.$$

Используем выражение (18)

$$\begin{aligned} \Sigma \sin \frac{\pi}{2} \frac{Y_n}{\tau_2} &= \sin \frac{\pi}{2} \frac{5}{9} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{7}{9} + \sin \frac{\pi}{2} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{11}{9} + \\ &+ \sin \frac{\pi}{2} \frac{13}{9} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{15}{9} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{17}{9} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{19}{9} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{21}{9} + \\ &+ \sin \frac{\pi}{2} \frac{23}{9} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{25}{9} + \sin \frac{3\pi}{2} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{29}{9} + \sin \frac{\pi}{2} \frac{31}{9} = 0. \end{aligned}$$

Если подсчитать левую часть этого выражения, то получим

$$0 = 0.$$

Следовательно, такой БЭМУ можно изготовить.

Этот пример можно решить графически, для чего строится звезда пазовых э. д. с. для потока Φ_{p2} , и геометрическим сложением э. д. с. обеих сторон определяется э. д. с. каждой катушки управления. Если векторы э. д. с. всех катушек будут уравниваться, то это означает, что обмотка управления не будет индуктивно связана с обмоткой W_{p2} .

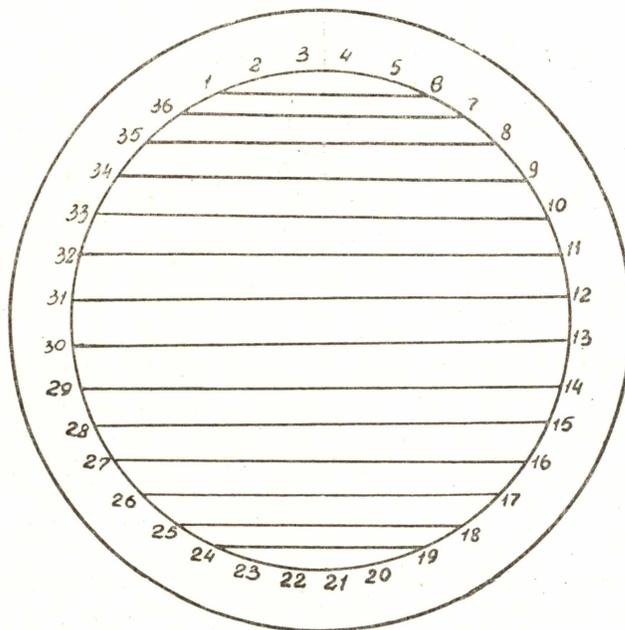


Рис. 2. Схема концентрической обмотки управления БЭМУ.

На рис. 2 дана схема концентрической обмотки управления, а на рис. 3 построена звезда пазовых э. д. с. для потока Φ_{p2} с числом полюсов $2P_2=4$, графически определены э. д. с. каждой катушки об-

мотки управления от потока Φ_{p2} . Из него видно, что сумма э. д. с. всех катушек равна нулю.

Изготовленный нами бесколлекторный электромашинный усилитель с concentрической обмоткой управления выполнен в соответствии с этим примером.

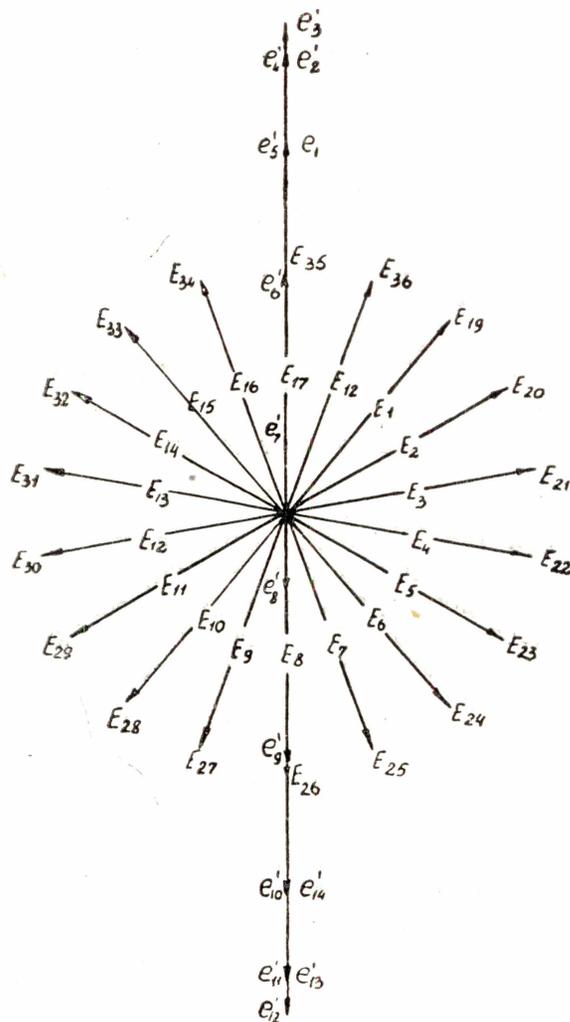


Рис. 3. Звезда пазовых э. д. с. для потока Φ_{p2}

Для выполнения условия, при котором совмещение в одном магнитопроводе двух вращающихся магнитных полей не вызывает сил односторонних магнитных притяжений и вибраций, целесообразно ориентироваться на рекомендацию, данную Р. Рихтером [3]. Должно выполняться неравенство

$$P_1 \pm P_2 \neq \pm 1. \quad (20)$$

В изготовленном нами БЭМУ это условие не выполнено. Разработка и исследования БЭМУ продолжаются.

Выводы

1. В связи с важностью применения усилителей в различных схемах автоматического регулирования необходимость разработки бесколлекторных ЭМУ постоянного и переменного тока, имеющих определенные преимущества по сравнению с коллекторными, очевидна.

2. Изложенные условия совместимости двух каскадов в одном магнитопроводе служат основанием для проектирования бесколлекторных ЭМУ с сосредоточенной, распределенной и концентрической обмотками управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. РЖЭ, № 8, 1960, 3.5505П.
2. Патент США, Кл. 318—148, № 2966623, 27.12.60. Машины переменного тока с многократным возбуждением. РЖЭ, 1962, № 2, и 113П.
3. Р. Рихтер. Электрические машины. т. IV, ОНТИ, 1939.
4. А. Д. Имас. Разработка и исследование высоко-частотных электросверл. Отчет по теме № 16, ДОНУГИ, Донецк, 1948.
5. В. С. Новокшенов. Обмоточный коэффициент и условия совместимости двух равнополюсных машин в одном магнитопроводе. Известия ТПИ, т. 117, 1963.
6. М. С. Михайлов-Микулинский. Расчет магнитных цепей электрических машин с двумя вращающимися полями. Электромеханика, № 10, 1962.