

ПАРАМЕТРЫ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ОБЫЧНОЙ КОММУТАЦИИ К ВЕНТИЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ

О. А. Братковский, В. В. Ивагин, И. А. Милорадов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Рассмотрим изменение параметров машины постоянного тока при переходе от обычной схемы коммутации (рис. 1) к одной из перспективных схем вентильно-механической коммутации (ВМК) (рис. 2) с включением вентилей в коммутируемую секцию на весь период ее замыкания подразделенной щеткой и с загрузкой вентилей полным током щеточного brackets [1]. Предполагается, что основные параметры (мощность, напряжение, скорость вращения, число полюсов, геометрия и основные размеры активных частей, диаметр коллектора) остаются неизменными. В дальнейшем параметры машины с обычной коммутацией обозначаются индексом «1», а машины с ВМК — индексом «2».

Исходные положения

Введем следующие обозначения: b — ширина щеток, β — число коллекторных пластин, перекрываемых щеткой, t — коллекторное деление, Z — число пазов якоря, U_n — число коллекторных пластин на паз.

В машинах с обычной коммутацией

$$\frac{b_1}{t_1} = \beta_1 > 1, \quad (1)$$

В схеме ВМК (рис. 2) коллектор сдвоенный и состоит из чередующихся рабочих и холостых пластин одинакового размера. При этом

$$\frac{b_2}{t_2} = \beta_2 = 1, \quad (2)$$

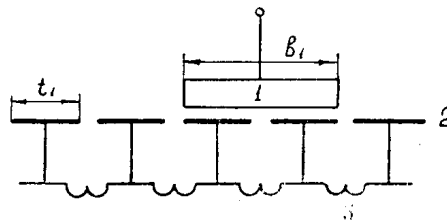


Рис. 1. Обычная схема коммутации:
1 — щетка, 2 — коллектор, 3 —
секция якоря

Известно [2], что каждому диаметру якоря соответствует свое оптимальное число пазов. Поэтому если Z_1 выбрано правильно, то необходимо, чтобы при переходе в ВМК

$$Z_2 \approx Z_1. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что обычно отношение $\frac{u_{п1}}{\beta_1}$ достаточно близко к единице, с учетом (1) — (3) можно записать

$$\frac{b_2}{b_1} \approx \frac{u_{п1} \cdot z_1 \cdot \beta_2}{u_{п2} \cdot z_2 \cdot \beta_1} \approx \frac{1}{u_{п2}}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что для принятых условий b_2/b_1 не может быть больше единицы. По соображениям наименьшей плотности тока в щеточном контакте из (4) получаем исходные соотношения для перехода к схеме ВМК (рис. 2):

$$b_2 \approx b_1, U_{н2} = 1. \quad (5)$$

В отдельных случаях возможны отклонения от (5), однако наибольший интерес представляет анализ изменения параметров при условии

$$b_2 = b_1, \quad (6)$$

$$U_{н2} = 1. \quad (7)$$

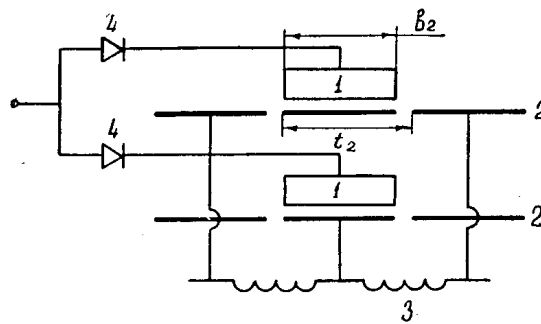


Рис. 2. Схема вентильно-механической коммутации: 1 — подразделенная щетка, 2 — двойной коллектор, 3 — секция якоря, 4 — вентиль

Число коллекторных пластин (К)

С учетом (2), (6) получаем число рабочих коллекторных пластин на двойном коллекторе (рис. 2)

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta_1}. \quad (8)$$

K_2 необходимо округлять до ближайшего четного знака. При этом получим $b_2 \neq b_1$. Однако этим изменением, ввиду его малости, при дальнейшем анализе можно пренебречь.

Плотность тока в щеточном контакте ($j_{щ}$) и длина коллектора

Рассмотрим только простейший случай — прямолинейную коммутацию, когда плотность тока в щеточном контакте машины с ВМК постоянна и равна

$$j_{щ2} = \frac{I_{щ2}}{S_{щ2}}.$$

Учитывая, что $I_{щ2} = I_{щ1}$ и $b_2 = b_1$, получаем

$$\frac{j_{щ2}}{j_{щ1}} = \frac{l_{щ1}}{l_{щ2}} \approx \frac{l_{к1}}{l_{к2}}. \quad (9)$$

Здесь $I_{щ}$ — максимальный ток через щетку, $S_{щ}$ — площадь контакта щетки с коллектором, $l_{щ}$ — длина щетки (рис. 3), $l_{к}$ — длина рабочей поверхности одного коллектора (рис. 3).

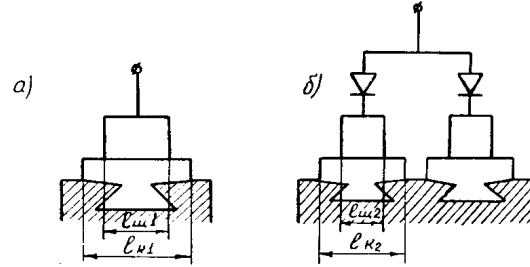


Рис. 3. Расположение щеток на коллекторе при обычной коммутации (а) и при ВМК (б)

Число пазов якоря (z)

Учитывая (2), получаем

$$z_2 = \frac{u_{п1}}{\beta_1 \cdot u_{п2}} \cdot z_1 = \frac{u_{п1}}{\beta_1} \cdot z_1. \quad (10)$$

Обмотка якоря

В машинах со схемой ВМК (рис. 2) принципиально возможно применение как петлевых, так и волновых обмоток (рассматриваются одноходовые обмотки). Но при ВМК число секций обмотки (как и число рабочих коллекторных пластин) должно быть четным. Это требование накладывает определенное ограничение на соотношение числа коллекторных пластин K_2 и числа пар полюсов p_2 .

Ширина коммутационной зоны ($b_{кз}$)

Учитывая, что

$$b_{кз} = b \frac{D}{D_k} + \left(u_{п} + \varepsilon_k - \frac{a}{p} \right) t \cdot \frac{D}{D_k}, \quad [2],$$

$$t \approx \frac{b}{\beta}, \quad D_2 = D_1, \quad D_{к2} = D_{к1}, \quad \beta_2 = 1,$$

после преобразования получаем

$$b_{кз2} = \frac{1 + \left(u_{п2} + \varepsilon_{к2} - \frac{a_2}{p_2} \right)}{1 + \left(u_{п1} + \varepsilon_{к1} - \frac{a_1}{p_1} \right) \frac{1}{\beta_1}} \cdot b_{кз1}. \quad (11)$$

Здесь a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря,
 p — число пар полюсов машины,
 D — диаметр якоря,
 D_k — диаметр коллектора,
 ε — укорочение шага обмотки в коллекторных делениях.

В табл. 1 приведены подсчитанные по (11) с учетом (2), (6) значения b_{k2}/b_{k1} для наиболее распространенных пределов изменения параметров: $U_{n1} = 2-4$; $\beta_1 = (0,75-1,0) U_{n1}$; $\varepsilon_k \leq U_{n1}$; $\varepsilon_{k1} = 0-(2-4)$; $\varepsilon_{k2} = 0-1$; $p_2 = p_1 = 1-3$; $\frac{a_1}{p_1} = \frac{a_2}{p_2} = 1; 1/3$.

Т а б л и ц а 1

| Род обмотки | $U_{n1} \beta_1$ | | b_{k2}/b_{k1} | |
|---------------------------------|------------------|-------|----------------------|----------------------|
| | | | $\varepsilon_{k2}=0$ | $\varepsilon_{k2}=1$ |
| Петлевая $\frac{a}{p} = 1$ | 2 | 1,5—2 | 0,333—0,667 | 0,667—1,334 |
| | 4 | 3—4 | 0,3 —0,572 | 0,6 —1,144 |
| Волновая $\frac{a}{p} = 1/3$ | 2 | 1,5—2 | 0,489—0,91 | 0,775—1,450 |
| | 4 | 3—4 | 0,47—0,87 | 0,750—1,390 |

Число витков в секции (W_s)

Так как при переходе к ВМК эдс якоря не изменяется, а подразделенность якорной обложки уменьшается в k_2/k_1 раз, то с учетом (2)

$$W_{s2} = \frac{a_2 \cdot K_1}{a_1 \cdot K_2} \cdot W_{s1} = \frac{a_2}{a_1} \cdot \beta_1 \cdot W_{s1}. \quad (12)$$

Активное сопротивление секции (r_s)

В первом приближении можно считать, что при переходе к ВМК остаются неизменными коэффициент заполнения медью активного слоя, средняя длина витка, температура обмотки якоря, а сечение эффективного проводника изменяется пропорционально a_2/a_1 .

$$r_{s2} = \frac{a_2 \cdot W_{s2}}{a_1 \cdot W_{s1}} \cdot r_{s1} = \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \cdot \beta_1 \cdot r_{s1}. \quad (13)$$

Индуктивность секции (L_s)

Известно [3], что

$$L_s = 2W_s^2 \cdot l \cdot \lambda, \quad (14)$$

$$\lambda = \lambda_{\Pi} + \lambda_{\text{лб}} \cdot \frac{l_{\text{лб}}}{l},$$

где l — длина пакета якоря, $l_{\text{лб}}$ — длина лобовой части секции, λ — удельная магнитная проводимость секции (на единицу длины пакета якоря) без учета взаимоиндукции с другими секциями в пазу; λ_{Π} , $\lambda_{\text{лб}}$ — магнитные проводимости пазовой и лобовой части секции на единицу их длины.

При переходе к ВМК с учетом (12) получаем

$$L_{S2} = \frac{W_{S2}^2 \lambda_2}{W_{S1}^2 \lambda_1} \cdot L_{S1} = \left(\frac{a_2}{a_1} \cdot \beta_1 \right)^2 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} L_{S1}.$$

В первом приближении

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 1; \quad L_{S2} = \left(\frac{a_2}{a_1} \cdot \beta_1 \right)^2 \cdot L_{S1}. \quad (15)$$

Результирующая индуктивность секции (L_{sp})

Сравнение проведем на базе общепринятых положений прямолинейной коммутации [3].

По аналогии с (14) имеем

$$L_{sp} = 2 \cdot W_s^2 \cdot l \cdot \xi, \quad (16)$$

$$\xi = \lambda'_n + \lambda_{лб} \cdot \frac{l_{лб}}{l} = k' \cdot \lambda_n + \lambda_{лб} \cdot \frac{l_{лб}}{l}.$$

Здесь

ξ — средняя удельная магнитная проводимость секции (на единицу длины ее пазовой части) с учетом взаимоиндукции,

λ'_n — средняя удельная магнитная проводимость пазовой части секции с учетом взаимоиндукции,

k' — коэффициент, учитывающий изменение λ_n из-за наличия взаимоиндукции.

При переходе к ВМК, учитывая (16), получаем

$$L_{sp2} = \frac{W_{S2}^2 \xi_2}{W_{S1}^2 \xi_1} \cdot L_{sp1} = \left(\frac{a_2}{a_1} \beta_1 \right)^2 \cdot \frac{\xi_2}{\xi_1} \cdot L_{sp1}.$$

Для анализа в первом приближении можно принять

$$\lambda_{лб2} \cdot \frac{l_{лб2}}{l_2} \approx \lambda_{лб1} \cdot \frac{l_{лб1}}{l_1} \approx 0; \quad \lambda_{n2} = \lambda_{n1}.$$

В этом случае

$$\frac{\xi_2}{\xi_1} = \frac{k'_2}{k'_1}; \quad L_{sp2} = \left(\frac{a_2}{a_1} \cdot \beta_1 \right)^2 \cdot \frac{k'_2}{k'_1} \cdot L_{sp1}. \quad (17)$$

На основании данных [2] в табл. 2 приведены пределы изменения отношения k'_2/k'_1 при $U_{n1} = 2-4$; $\beta_1 = (0,75-1,0)U_{n1}$; $\epsilon_{K1} = 0-(2-4)$; $\epsilon_{K2} = 0-1$.

Таблица 2

| U_{n1} | β_1 | k'_2/k'_1 | |
|----------|-----------|-------------------|-------------------|
| | | $\epsilon_{K2}=0$ | $\epsilon_{K2}=1$ |
| 2 | 1,5—2 | 0,668—1,330 | 0,333—0,665 |
| 4 | 3—4 | 0,364—0,750 | 0,182—0,375 |

Коммутирующая эдс в секции (e_K)

При прямолинейной коммутации

$$e_K = L_{sp} \cdot \frac{2i_a}{T},$$

где i_a — ток в параллельной ветви обмотки якоря,
 T — период коммутации секции.
 При переходе к ВМК

$$i_{a2} = i_{a1} \cdot \frac{a_1}{a_2}; \quad T_2 = T_1,$$

Учитывая (17), а также то, что на практике e_k увеличивается в k_y раз для создания ускоренной коммутации и k_{y2} обычно больше k_{y1} , получаем

$$e_{k2} = \frac{a_2}{a_1} \cdot \beta_1^2 \cdot \frac{k_{y2} \cdot k'_2}{k_{y1} \cdot k'_1} \cdot e_{k1}, \quad (18)$$

где k_y — коэффициент ускорения коммутации.

Число витков обмотки дополнительного полюса (W_d)

В нормально выполненных машинах магнитная цепь дополнительных полюсов должна быть ненасыщенной и падением намагничивающей силы в ее стальных участках можно пренебречь. Тогда

$$W_d = \frac{F_{ря} + F_{\delta_d}}{I_a}; \quad F_{\delta_d} = m \cdot B_{\delta_d}; \quad B_{\delta_d} = \frac{e_k}{2W_s \cdot v \cdot l}. \quad (19)$$

Здесь

- $F_{ря}$ — н. с. реакции якоря ($F_{ря2} = F_{ря1}$),
- F_{δ_d} — н. с. воздушного зазора под дополнительным полюсом,
- I_a — ток якоря ($I_{я2} = I_{я1}$),
- B_{δ_d} — индукция в воздушном зазоре под дополнительным полюсом,
- m — коэффициент пропорциональности между F_{δ_d} и B_{δ_d} ($m_2 = m_1$),
- v — линейная скорость якоря ($v_2 = v_1$).

После преобразований с учетом (12), (18), (19) получаем

$$B_{\delta_{d2}} = \beta_1 \frac{k_{y2} \cdot k'_2}{k_{y1} \cdot k'_1} B_{\delta_{d1}}; \quad W_{d2} = \frac{1 + \beta_1 \cdot \frac{k_{y2} \cdot k'_2}{k_{y1} \cdot k'_1} \cdot \frac{F_{\delta_{d1}}}{F_{ря1}}}{1 + \frac{F_{\delta_{d1}}}{F_{ря1}}} \cdot W_{d1}. \quad (20)$$

Сечение дополнительного полюса (S_d), спинки якоря (S_a) и ярма индуктора (S_j)

Как указывалось выше, при переходе к ВМК изменяется ширина коммутационной зоны (табл. 1) и индукция в зазоре под дополнительным полюсом (20). Очевидно, что при переходе к ВМК поток в магнитных участках цепи дополнительного полюса изменится в

$$\beta_1 \cdot \frac{k_{y2} \cdot k'_2 b_{кз2}}{k_{y1} \cdot k'_1 \cdot b_{кз1}} = A \text{ раз.}$$

Если индукции в магнитных участках цепи дополнительного полюса в машине с обычной коммутацией выбраны правильно (нет насыщения), то, исходя из их сохранения, получаем

$$S_{д2} = AS_{д1}; \quad S_{a2(j2)} = \frac{1 + A \frac{\Phi_{д1}}{\Phi_{Г1}}}{1 + \frac{\Phi_{д1}}{\Phi_{Г1}}} \cdot S_{a1(j1)}, \quad (21)$$

где $\Phi_{д}$ и $\Phi_{Г}$ — магнитные потоки дополнительного и главного полюсов.

В табл. 3 в качестве примера приведены найденные с учетом (1) — (21) и табл. 1 и 2 соотношения параметров машин при $U_{н1} = 2-4$; $\beta_1 = (0,75-1,0)U_{н1}$; $\epsilon_{к2} \leq U_{н2}$; $a_2 = a_1$; $b_2 = b_1$; $l_{к2} = 0,5 l_{к1}$; $U_{н2} = \beta_2 = 1$; $k_{y1} = 1,15$; $k_{y2} = 1,5-2$; $\frac{\Phi_{д1}}{\Phi_{Г1}} = 0,1-0,2$; $F_{\delta д1}/F_{рy1} = 0,05-0,2$. Цифры, стоящие в табл. 3 слева, относятся к значениям $\beta_1 = 1,5$, а справа — к $\beta_1 = 4$.

Таблица 3

| K_2/K_1 | $j_{щ2}/j_{щ1}$ | Z_2/Z_1 | $\frac{W_{с2}}{W_{с1}} = \frac{r_{с2}}{r_{с1}}$ | $L_{с2}/L_{с1}$ | L_{sp2}/L_{sp1} | |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | | | | $\epsilon_{к2}=0$ | $\epsilon_{к2}=1$ |
| 0,67—0,25 | 2 | 1,33—1,0 | 1,5—4 | 2,25—16 | 1,69—9,5 | 0,88—4,73 |
| $\epsilon_{к2}/\epsilon_{к1}$ | | $B_{\delta д1}/B_{\delta д1}$ | | $W_{д2}/W_{д1}$ | | |
| $\epsilon_{к2}=0$ | $\epsilon_{к2}=1$ | $\epsilon_{к2}=0$ | $\epsilon_{к2}=1$ | $\epsilon_{к2}=0$ | $\epsilon_{к2}=1$ | |
| 2,2—16,5 | 1,15—8,25 | 1,47—4,12 | 0,735—2,06 | 1,02—1,52 | 0,98—1,18 | |
| Род обмотки | $b_{кз2}/b_{кз1}$ | | $S_{д2}/S_{д1}$ | | $S_{a2(j2)}/S_{a1(j1)}$ | |
| | $\epsilon_{к2}=0$ | $\epsilon_{к2}=1$ | $\epsilon_{к2}=0$ | $\epsilon_{к2}=1$ | $\epsilon_{к2}=0$ | $\epsilon_{к2}=1$ |
| Петлевая | 0,333—0,572 | 0,667—1,14 | 0,49—2,36 | | 0,955—1,23 | |
| Волновая | 0,484—0,87 | 0,775—1,39 | 0,715—3,62 | 0,57—2,86 | 0,975—1,44 | 0,96—1,31 |

Выводы

1. Как видно из табл. 3, при переходе от обычной коммутации к ВМК (рис. 2) происходят следующие изменения параметров машины, зависящие в основном от β_1 :

а) уменьшается число коллекторных пластин, число секций, т. е. подразделенность якорной обмотки, что, естественно, приведет к некоторому увеличению пульсации эдс и тока якоря;

б) увеличивается плотность тока в щеточном контакте $j_{щ}$ при неизменных габаритах коллектора (или его габариты — при неизменной плотности тока). Следует отметить, что сохранение $j_{щ}$ при переходе к ВМК не всегда обязательно. Известно [4], что данная схема ВМК может нормально работать при $j_{щ}$ до 50 а/см^2 , т. е. сдвоенный коллектор по габаритам может и не отличаться от обычного;

в) увеличивается число витков W_s , активное сопротивление r_s и индуктивность L_s секций якоря. Известно [4, 5], что увеличение W_s и L_s не вызывает ухудшения коммутации, как в обычных машинах. Увеличение r_s несколько ухудшает коммутацию при пуске машины в режиме двигателя;

г) в большинстве случаев увеличиваются: результирующая индуктивность секции L_{sp} , индукция под добавочным полюсом $B_{\delta д}$, число витков дополнительного полюса $W_{д}$. Ограничить их увеличение можно

укорочением шага обмотки при ВМК $\epsilon_{к2}=1$. При увеличении W_d несколько увеличиваются и размеры обмотки дополнительного полюса;

д) увеличивается коммутирующая эдс в секции e_k , что физически объясняется увеличением W_s , L_{sp} и необходимостью при ВМК более ускоренной коммутации. Увеличение e_k так же, как и W_s , не вызывает какого-либо ухудшения условий коммутации;

е) ширина коммутационной зоны $b_{к3}$ при $\epsilon_{к2}=0$ уменьшается, а при $\epsilon_{к2}=1$ в отдельных случаях — увеличивается;

ж) сечения сердечника дополнительного полюса S_d , спинки якоря S_a и ярма индуктора S_j могут увеличиваться или уменьшаться. В среднем их возможное увеличение меньше, чем e_k или $B_{\delta d}$.

2. Соотношения $b_2 \approx b_1$ и $U_{п2}=1$ могут использоваться как исходные при определении параметров машины со схемой ВМК (рис. 2).

3. При переходе к ВМК не происходит какого-либо заметного ухудшения характеристик или существенного увеличения веса машины, а ее коммутационная устойчивость значительно повышается [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Братковский, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Схемы вентильно-механической коммутации машин постоянного тока (см. настоящий сборник).

2. П. С. Сергеев и др. Проектирование электрических машин, Госэнергоиздат, 1956.

3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, ч. I. «Энергия», 1964.

4. Bates I., Sridhar T., Thyristor-assisted sliding contact commutation, Proc. Inst. El. Engrs. 1966, Vol 113, № 2.

5. О. А. Братковский, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Экспериментальная проверка машины постоянного тока с вентильно-механической коммутацией (см. настоящий сборник).