

ISSN 0236—2910

ВЕСТНИК МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

НАУЧНО-ПУБЛИЦИСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТН. МОРД. УНИВ. 1995. № 1. С. 1—80.

1
1995

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
БЕСКОНТАКТНОГО АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО
ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСТАНОВИВШИХСЯ
РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

В. Ф. БАЙНЕВ, аспирант,
Ю. П. СОНИН, доктор технических наук,
И. В. ГУЛЯЕВ, кандидат технических наук

В ряде областей электропривода на-
ряду с очевидными преимуществами
выявились существенные недостатки
вентильных двигателей (ВД) постоян-
ного тока. Ограничения режима убора,
невозможность электрического рекуп-

ративного торможения до полной ос-
тановки, трудности при обеспечении
ускоренного реверса — все это в зна-
чительной степени сужает область при-
менения ВД. Указанные недостатки
могут быть преодолены при использо-

вания асинхронизированного ветильного двигателя (АВД), в частности бесконтактного (БАВД). Последний благодаря отсутствию скользящих контактов может эксплуатироваться в увлажненных, запыленных и агрессивных средах.

БАВД представляет собой каскад двух электрических машин: собственно АВД и его возбuditеля, статоры которых питаются от двух преобразователей частоты, а роторы имеют механическую и электрическое соединения. Такая структура позволяет реализовать различные варианты режимов работы машины. При этом возбuditель в зависимости от способа управления БАВД может работать либо с постоянным абсолютным скольжением, либо с постоянной частотой питания [1, 2].

Для обеспечения БАВД принципа действия обобщенного двигателя постоянного тока (ДПТ) необходимо выполнить следующие требования:

— преобразователь частоты якоря АВД должен иметь инверторное звено по типу инвертора тока и жестко фиксировать фазу тока относительно его напряжения;

— преобразователь частоты статора возбuditеля должен иметь инверторное звено по типу инвертора напряжения и обеспечивать свободный обмен энергией между обмоткой статора и питающей сетью.

Система уравнений Парка — Горва установившегося режима БАВД, записанная в синхронных координатах якоря (в относительных единицах), имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (r + jx) \dot{I} + jx_{ar} \dot{I}_r; \\ 0 &= (r_r + jx_r) \dot{I}_r + jx_{ar} \dot{I} + jx_{r1} \dot{I}_f; \\ \dot{U}_f &= (r_f + jx_{f1}) \dot{I}_f + jx_{r1} \dot{I}_r; \\ M_d &= \operatorname{Rej}(\dot{I}_r, \dot{I}) x_{ar}; \\ M_a &= \operatorname{Rej}(\dot{I}_r, \dot{I}_f) k_p x_{fr}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \dot{U} , \dot{U}_f — комплексные функции напряжений якоря АВД и статора возбuditеля; \dot{I} , \dot{I}_r , \dot{I}_f — комплексные функции токов якоря АВД, обмоток статора

возбuditеля, ротора двигателя и возбuditеля; r , r_r , r_f — активные сопротивления соответственно якоря АВД, обмотки статора возбuditеля, ротора двигателя и возбuditеля; x , x_r — пассивные индуктивные сопротивления якоря АВД и обмотки статора возбuditеля; x_{ar} , x_{r1} — сопротивления взаимной индукции обмоток ротора и статора АВД, обмоток ротора и статора возбuditеля; ν , ν_f , ω_0 — относительные угловые частоты напряжений обмоток якоря АВД, статора возбuditеля и роторов двигателя и возбuditеля; M_d , M_a — электромагнитные вращающие моменты двигателя и возбuditеля; k_p — отношение чисел пар полюсов возбuditеля P_a и двигателя P_d ($k_p = P_a/P_d$).

Наиболее общим случаем является управление БАВД без осуществления контроля за величиной магнитного потока в воздушном зазоре АВД при поддержании $\nu_f = \operatorname{const}$. При этом рассматриваемая электромеханическая система имеет наибольшее число степеней свободы и связь между ее параметрами выражается только уравнениями системы (1). В силу этого управление БАВД с $\nu_f = \operatorname{const}$ является наиболее сложным случаем для теоретического анализа, а все остальные законы управления необходимо рассматривать как частные варианты данного режима работы. При разработке и исследовании математической модели БАВД учитывалось насыщение магнитных систем как двигателя, так и возбuditеля. Однако не учтены магнитные и механические потери, насыщение зубцовых зон магнитопроводов, влияние высших гармонических составляющих. Частота тока в роторе при $\nu_f = \operatorname{const}$ определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{\nu_f + k_p \nu}{1 + k_p}. \quad (2)$$

Из уравнений системы (1) можно определить значения токов:

$$\dot{I} = \frac{U \sin \theta}{r \sin(\varphi + \theta) + ix \cos(\varphi + \theta)}, \quad (3)$$

где θ — угол нагрузки БАВД (угол между векторами напряжений на

якоря U_f и взаимной индукции с ротором $U_{\text{вд}} = \nu x_{\text{вд}} I_r$.

$$I_r = \frac{(x \sin \varphi + \nu \cos \varphi) I}{\nu x_{\text{вд}} \sin \theta} \quad (4)$$

Активная и реактивная составляющие тока возбуждателя вычисляются с учетом найденных значений I и I_r :

$$I_{\text{га}} = [I_r (x_r \sin \theta + r_r \cos \theta / s_0) - x_{\text{вд}} I \cos \varphi] / x_{\text{вд}} \quad (5)$$

$$I_{\text{гп}} = [I_r (x_r \cos \theta - r_r \sin \theta / s_0) - x_{\text{вд}} I \sin \varphi] / x_{\text{вд}} \quad (6)$$

Подстановка значений токов в соответствующие уравнения системы (1) позволяет рассчитать электромагнитные моменты двигателя и возбуждателя:

$$M_d = \frac{U^2 \sin \theta \cos \varphi (r_g \varphi + \nu x)}{\nu \cos(\varphi + \theta) (r_g(\varphi + \theta) + \nu x)^2} \quad (7)$$

$$M_b = k_p (M_d - I_r^2 r_r / s_0) \quad (8)$$

где $I_r^2 r_r / s_0$ — тормозной асинхронный момент возбуждателя.

Суммарный момент, развиваемый машиной, выражается равенством

$$M_{\text{БВД}} = M_d + M_b = M_d (1 + k_p) - k_p I_r^2 r_r / s_0 \quad (9)$$

Для БВД справедливы соотношения, связывающие частоты токов в роторах и статорах машины со скоростью вращения ротора:

$$s_0 = k_p \nu_{\text{гд}} + \nu_f; \\ \nu_{\text{гд}} = \nu - s_0,$$

где $\nu_{\text{гд}}$ — относительная частота вращения ротора соответственно числу пар полюсов двигателя P_d .

С учетом этих соотношений можно определить механическую мощность на валу БВД:

$$P_{\text{мех}} = \nu_{\text{гд}} (M_d + M_b) = \nu_{\text{гд}} \left((1 + k_p) M_d - k_p I_r^2 r_r / s_0 \right);$$

$$P_{\text{мех}} = (\nu - \nu_f) \left(M_d - \frac{k_p r_r I_r^2}{k_p \nu + \nu_f} \right) \quad (10)$$

Положение вектора U_f определяется его активной и реактивной составляющими:

$$U_{\text{га}} = r_r I_{\text{га}} - \nu_f (x_r I_{\text{гп}} + x_{\text{вд}} I_r \cos \theta); \quad (11)$$

$$U_{\text{гп}} = r_r I_{\text{гп}} + \nu_f (x_r I_{\text{га}} - x_{\text{вд}} I_r \sin \theta). \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) используются в программной модели БВД при определении установившейся частоты инвертора тока при данном угле нагрузки путем проверки истинности выражения $U_f = \sqrt{U_{\text{га}}^2 + U_{\text{гп}}^2}$ во всем интервале реально допустимых значений ν . Для анализа угловых и рабочих характеристик БВД можно использовать выражение частоты якоря АД:

$$\nu = \frac{U - r_l \cos \varphi}{x_{\text{вд}} I_r \cos \theta - x_l \sin \varphi} \quad (13)$$

На основе выражений (2) — (13) создана программная модель для IBM PC-AT/286 на языке программирования TurboPascal, позволяющая рассчитывать угловые и рабочие характеристики БВД для основных законов управления. С ее помощью получены характеристики БВД, построенного на базе двух асинхронных двигателей: 4АНК355М8У3 ($P_{2\text{н}} = 220$ кВт, $P_{\text{д}} = 4$) — АД, 4АНК200М4У3 ($P_{2\text{н}} = 37$ кВт с перемоткой на $P_{\text{д}} = 1$) — возбуждатель. На рис. 1 и 2 изображены соответственно угловые и рабочие характеристики машины.

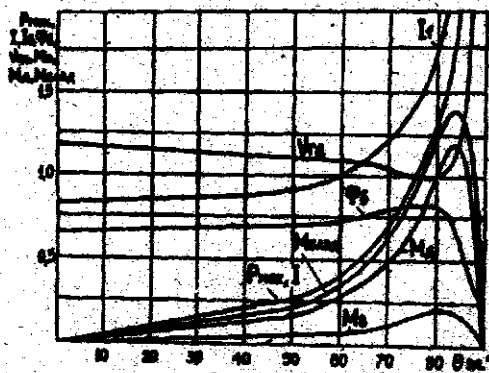


Рис. 1. Угловые характеристики БВД при $\nu_f = 0,1, \varphi = 0$

важни
ного ди
контак
годари
тов мо
исним
средах.

БАР
двух эл
АВД в
рых пл
лей час
ческой
Такая
вать ра
боты м
в завис
БАРД и
ным аб
постоян

Для
действи
яного
нить сл
— п
АВД до
по типу
сировати
напряже
— пр
возбуди
звено п
и обеспе
гней ме
ющей се
Систе

ва устан
писанна
якоря (и
имеет сл

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (r + \\ \dot{\Phi} &= (r_r + \\ \dot{U}_f &= (r_f + \\ M_d &= Rej \\ M_s &= Rej \end{aligned}$$

где \dot{U} , \dot{U}_f
пряженн
будителя;
дней токов

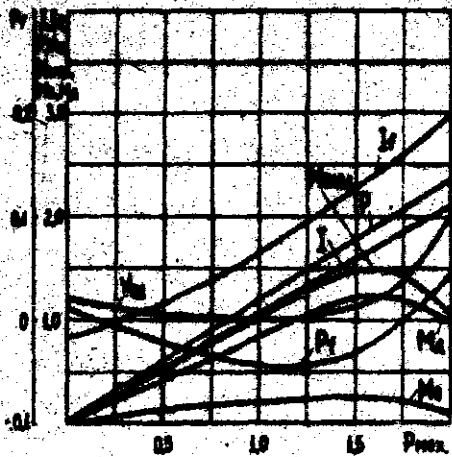


Рис. 2. Рабочие характеристики БАРД при $s_1 = 0.1$ и $\varphi = 0$

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы.

1. Сравнение характера кривых $\Phi\delta = f(\theta)$ и $v_{fd} = f(\theta)$ свидетельствует об аналогии скоростных характеристик БАРД и ДПТ. У БАРД возможно осуществлять плавное регулирование скорости как по цепи якоря, так и по цепи возбуждения, что придает БАРД свойства, присущие ДПТ, и обеспечивает ему широкие возможности для оптимального управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соин Ю. П., Юшков С. А., Прусков Ю. И. Бесконтактный синхронизированный вентильный двигатель // Электричество. 1989. № 11. С. 41 — 46.

2. Возбудитель в номинальном режиме работы БАРД создает свой собственный электромагнитный момент, составляющий 15 — 20 % от величины момента двигателя и совпадающий с ним по знаку. При малых углах нагрузки возбудитель переходит в режим электромагнитного тормоза, что является в ряде случаев необходимым (например, в гребном электроприводе при швартовке судов).

3. Характер кривой $P_1 = f(\theta_{наг})$ свидетельствует о транзите активной мощности из цепи якоря в цепь статора возбудителя, так как активная мощность возбудителя отрицательна в значительном интервале углов нагрузки.

4. Скоростная характеристика БАРД достаточно жесткая с небольшим отрицательным наклоном и является оптимальной для ряда электроприводов (например, в тяговом электроприводе железнодорожного транспорта).

В качестве недостатков БАРД при $s_1 = const$ следует отметить его относительно небольшую (полуторакратную) перегрузочную способность по моменту, а также наличие транзита активной мощности из цепи якоря в цепь статора возбудителя, что приводит к некоторому ухудшению энергетических показателей машины.

2. Соин Ю. П., Вайнер В. Ф., Гуляев И. В. Статические характеристики бесконтактного синхронизированного вентильного двигателя // Электротехника. 1994. № 9. С. 15 — 20.