



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
 ГЛАВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ  
 ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ  
 ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
 КОМИТЕТА ПО МАШИНОСТРОЕНИЮ РФ

Издается при содействии АО «Росэлпром»,  
 АО «Прогрессэлектро», ассоциации  
 инженеров силовой электротехники  
 и ассоциации «Автоматизированный  
 электропривод»

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1990 ГОДА

№ 9 СЕНТЯБРЬ 1994

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Птицын О.В., Григораш О.В. Генераторы переменного тока. Состояние и перспективы

Бондаренко А.К., Дмитренко Ю.И., Ковалев Е.Б., Ландкоф Л.Б., Макаров К.Д. Электродвигатель для горных машин с охлаждением вала проточной водой

Баранова Л.К., Гуков В.Н., Левин Б.М., Рожков В.М. Оценка механической стойкости круглых монтажных проводов в случаях их применения в электрических машинах малой мощности

Хайруллин И.Х., Янгиров Н.Ф., Немагилев Ф.Р. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом

Сонин Ю.П., Байшев В.Ф., Гуляев И.В. Статистические характеристики бесконтактного асинхронизированного вентиляционного двигателя

Ковалев Б.Ф. Коэффициенты ступенчатого сдвига частей магнитопроводов статора и скоса пазов зигзагообразной формы в асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором

Горелик П.В. К вопросу разработки асинхронных двигателей для приводов с параметрическим управлением частотой вращения

Пластун А.Т., Денисенко В.И., Рыбенко Е.И., Пульников А.А., Кичигин В.И., Онушин Ю.А., Хоробрых Г.В. Синхронный двигатель с совмещенным индукторным возбуждением

### ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

Плеханов В.М. Обоснованность системы диагностики эксплуатационного состояния высоковольтных выключателей

Лоханин А.К. Совершенствование методов координации изоляции электрооборудования высокого напряжения и их отражение в отечественных и международных стандартах

© Электротехника, 1994 г.

Вики М.А., Чижовский Ю.Л., Бредовой Е.И., Бранцев А.М., Жакутова С.В., Иващенко В.В., Краснояковцев В.А., Лейтес Л.В., Лурье А.И. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей высокого напряжения

### 2 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Гурин В.В., Соколов В.В. Обследование силовых трансформаторов в эксплуатации

6 Туркет В.А. Оценка состояния трансформаторных масел по проводимости

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

8 Булатов О.Г., Чадлыгин Е.В. Параметрическое микропроцессорное управление вентильными преобразователями

### 12 ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

15 Арсеньева Э.Д., Огоньков В.Г., Трубочко С.Г. Состояние и перспективы развития промышленности фольгированных материалов в России

20 Баркова Л.В., Геворкян Э.Т., Тюрина М.В. Ключевая роль энергии активации в прогнозировании и экспресс-оценке нагревостойкости электроизоляционных полимерных материалов

### 25 КОНДЕНСАТОРОСТРОЕНИЕ

28 Андреев А.М., Журавлева Н.М., Сажин Е.И., Луцкая Т.В. Оценка удельной энергоемкости пленочных полимерных конденсаторных структур, пропитанных жидкими диэлектриками

### ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

31 Герасимов Е.В., Казанов Ю.В., Тихонов А.И. Сопряженное моделирование стационарных физических полей методом конечных элементов

### НАШИ ЮБИЛЯРЫ

37 А.И. Подарусеву — 60 лет

## СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСКОНТАКТНОГО АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ю.П. СОНИН, доктор техн. наук, В.Ф. БАЙНОВ, инж., И.В. ГУЛЯЕВ, канд. техн. наук

Создание асинхронизированного вентильного двигателя в контактном (АВД) и бесконтактном (БАВД) исполнениях [1—6] является новым этапом в развитии вентильных электрических машин. АВД и БАВД практически не имеют ограничений в режиме упора, позволяют осуществить электрическое рекуперативное торможение до полной остановки электропривода, его ускоренный реверс, обладают высокими пусковыми и перегрузочными характеристиками. Принцип действия обобщенного двигателя постоянного тока (ДПТ) у АВД (БАВД) достигается определенными законами его управления во всех режимах работы:

поддержание примерного постоянства угла сдвига фаз первых гармоник напряжения и тока якоря  $\varphi \approx \text{const}$  с тактовой самосинхронизацией двигателя по положению магнитного поля;

поддержание постоянства частоты возбуждения  $\omega_f(v_f) = \text{const}$  или  $\omega_0(s_0 = \text{const})$ ;

превышение МДС обмотки возбуждения над МДС обмотки якоря;

регулирование скорости вращения АВД теми же способами, что и у ДПТ.

Указанные законы управления АВД и БАВД можно реализовать только в том случае, если обмотка якоря двигателя питается от преобразователя частоты (ПЧ) с выходным инвертором тока (ИТ), а обмотка возбуждения — от ПЧ<sub>в</sub> с инвертором напряжения (например, АИН с ШИМ или НПЧ).

Установившиеся режимы работы БАВД, представляющего собой последовательный каскад АВД и его возбудителя (В), рассматриваются при общепринятых допущениях с учетом насыщения главной магнитной цепи АВД и В на основе векторных уравнений Парка—Горена в системе синхронных координат якоря (о.с.).

Вначале рассматривается вариант БАВД с переменными значениями напряжения и частоты возбуждения.

Система уравнений БАВД в этом случае запишется следующим образом:

$$\underline{U} = (r + jv_x) \underline{I} + jv_x x_{ar} L_r; \quad (1)$$

$$0 = (r_r + js_0 x_r) L_r + js_0 x_{ar} \underline{I} + js_0 x_{fr} L_f; \quad (2)$$

$$\underline{U}_f = (r_f + jv_f x_f) L_f + jv_f x_{fr} L_r; \quad (3)$$

$$M_{\text{Д}} = \text{Re } j(\underline{L}_r \dot{\underline{I}}) x_{ar}; \quad (4)$$

$$M_{\text{В}} = \text{Re } j(\dot{\underline{I}}_r L_f) k_p x_{fr}; \quad (5)$$

где  $\underline{U}, \underline{U}_f$  — результирующие комплексные функции напряжений якоря АВД и статора возбудителя В;  $\underline{L}, \underline{L}_f, \underline{L}_r$  — результирующие комплексные функции токов обмоток якоря АВД, статора В и их роторов;  $r, r_f, r_r$  — активные сопротивления этих обмоток;  $x, x_f, x_r$  — их полные индуктивные сопротивления;  $x_{ar}, x_{fr}$  — сопротивления взаимной индукции обмоток якоря и ротора АВД, статора и ротора В с учетом насыщения;  $v, v_f, s_0$  — относительные угловые частоты напряжений обмоток якоря АВД, статора В и их роторов;  $M_{\text{Д}}, M_{\text{В}}$  — электромагнитные вращающие моменты АВД и В;  $k_p$  — отношение чисел пар полюсов возбудителя  $p_{\text{в}}$  и двигателя  $p_{\text{д}}$  ( $k_p = p_{\text{в}}/p_{\text{д}}$ ).

Частота тока в роторе БАВД при заданной частоте возбуждения  $v_f$  [6]:

$$s_0 = \frac{v_f + k_p v}{1 + k_p}.$$

Решение системы уравнений (1)—(3) позволяет определить значения токов в обмотках двигателя и их составляющие:

$$I = \frac{U \sin \theta}{r \sin(\varphi + \theta) + v_x \cos(\varphi + \theta)}; \quad (6)$$

$$I_r = \frac{(r \sin \varphi + v_x \cos \varphi) I}{v_x x_{ar} \sin \theta}; \quad (7)$$

$$I_{fa} = \frac{I_r (x_r \sin \theta + r_r \cos \theta / s_0) - x_{ar} I \cos \varphi}{x_{fr}}; \quad (8)$$

$$I_{fr} = \frac{I_r (x_r \cos \theta - r_r \sin \theta / s_0) - x_{ar} I \sin \varphi}{x_{fr}}; \quad (9)$$

где  $\theta$  — угол нагрузки БАВД (угол между векторами напряжения  $\underline{U}$  и ЭДС якоря АВД  $\underline{E} = -jv_x x_{ar} L_r$ ).

Электромагнитные вращающие моменты АВД, В и суммарный БАВД соответственно равны:

$$M_{\text{Д}} = \frac{U^2 \sin \theta \cos \varphi (r \lg \varphi + v_x)}{v \cos(\varphi + \theta) (r \lg(\varphi + \theta) + v_x)^2}; \quad (10)$$

При  $r \approx 0$  и  $\varphi \approx 0$

$$M_{\text{Д}} = \left(\frac{U}{v}\right)^2 \frac{\lg \theta}{x}; \quad (11)$$

$$M_{\text{В}} = k_p (M_{\text{Д}} - I_r^2 r_r / s_0); \quad (12)$$

$$M_{\text{БВВД}} = (1 + k_p) M_{\text{Д}} - k_p r_r I_r^2 / s_0 \quad (13)$$

Частоты токов обмоток роторов и якоря БВВД равны [6]:

$$s_0 = k_p v_{r\text{Д}} + v_f; \quad v = v_{r\text{Д}} + s_0,$$

где  $v_{r\text{Д}}$  — относительная частота вращения ротора АД.

С учетом этих соотношений механическая мощность БВВД [6]:

$$P_{\text{мех}} = v_{r\text{Д}} (M_{\text{Д}} + M_{\text{В}}) = v_{r\text{Д}} [(1 + k_p) M_{\text{Д}} - k_p r_r I_r^2 / s_0].$$

Причем в случае поддержания  $v_f = \text{const}$

$$P_{\text{мех}} = (v - v_f) \left( M_{\text{Д}} - \frac{k_p r_r I_r^2}{k_p v + v_f} \right), \quad (14)$$

а при  $s_0 = \text{const}$

$$P_{\text{мех}} = (v - s) [(1 + k_p) M_{\text{Д}} - k_p r_r I_r^2 / s_0]. \quad (15)$$

Для анализа рабочих и угловых характеристик БВВД можно использовать выражение частоты якоря, полученное из его векторной диаграммы:

$$v = \frac{U - r I \cos \varphi}{x_{ar} I_r \cos \theta - x I \sin \varphi}. \quad (16)$$

На основе приведенных выражений рассчитаны рабочие и угловые характеристики БВВД на базе двух серийных асинхронных двигателей: 4АНК355М8У3 ( $P_{2\text{н}} = 200$  кВт,  $p_{\text{Д}} = 4$ ) — АД, 4АНК225М4У3 ( $P_{2\text{н}} = 55$  кВт с перемоткой на  $p_{\text{в}} = 1$ ) — В.

Расчет характеристик БВВД выполнен для оптимального значения угла сдвига фаз напряжения и тока якоря АД по минимуму суммарной потребляемой мощности БВВД, а именно при  $\varphi = 0$  и  $v_f = \text{const}$  [6]. При этом в качестве номинального принят режим БВВД, при котором  $M_{\text{Д}} = 1,0$  и  $v_{r\text{Д}} = 1,0$ . Анализ полученных характеристик (рис. 1, а, б) позволяет сделать следующие выводы:

1. Скоростные характеристики БВВД  $v_{r\text{Д}} = f(P_2)$  при  $U_f = \text{const}$ ,  $v_f = \text{const}$  ( $v_f = 0,1$ ) подобны аналогичным характеристикам ДПТ параллельного возбуждения.

2. Возбудитель в номинальном режиме БВВД создает электромагнитный вращающий момент, составляющий 21,7% момента двигателя и совпадающий с ним по знаку.

3. Характер кривой активной мощности возбуждения  $P_f = f(P_2)$  свидетельствует о транзите активной мощности из цепи якоря в цепь статора В.

4. Угловые характеристики вращающего момента рассматриваемого варианта БВВД  $M_{\text{БВВД}} = f(\theta)$  (рис. 1, б) показывают, что он обладает

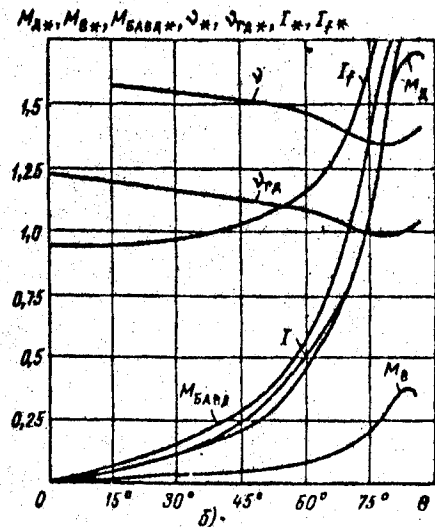
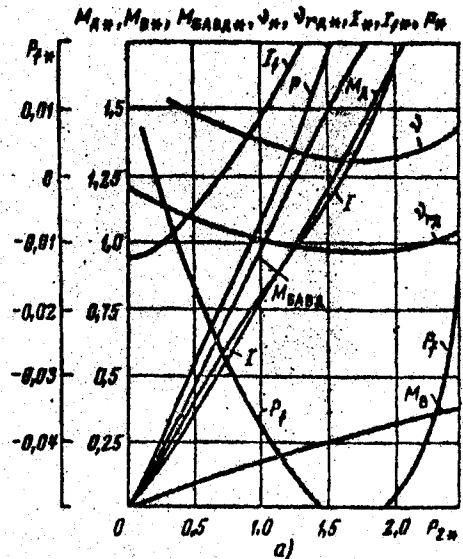


Рис. 1. Характеристики БВВД при  $v_f = \text{const}$ : а — рабочие  $M_{\text{Д}}$ ,  $M_{\text{В}}$ ,  $M_{\text{БВВД}}$ ,  $v_{r\text{Д}}$ ,  $I$ ,  $I_f$ ,  $P$ ,  $P_f = f(P_2)$ ; б — угловые  $M_{\text{Д}}$ ,  $M_{\text{В}}$ ,  $M_{\text{БВВД}}$ ,  $v_{r\text{Д}}$ ,  $I$ ,  $I_f = f(\theta)$

сравнительно низкой перегрузочной способностью. Так, при критическом угле нагрузки  $\theta_{\text{кр}} = 83^\circ$  его максимальный электромагнитный момент  $M_{\text{БВВДmax}} = 2,28$ .

В электроприводах постоянного тока с однозонным регулированием скорости наиболее распространены режимы ДПТ с неизменным магнитным потоком  $\Phi_{\delta} = \text{const}$ . Поэтому у БВВД, являющегося вариантом обобщенного ДПТ, представляют интерес его рабочие характеристики с неизменным результирующим магнитным потоком в воздушном зазоре АД  $\Phi_{\delta} = \text{const}$ , т.е. с неизменным насыщением его главной магнитной цепи за исключением зубцовых зон.

Система уравнений БВВД при  $\Phi_{\delta} (\Psi_{\delta}) = \text{const}$  [6]:

$$\underline{U} = (r + j v x_{\sigma}) \underline{I} + j v \underline{\Psi}_{\delta}; \quad (17)$$

$$0 = (r_r + j s_0 (x_{r\text{Д}} + x_{r\text{В}})) I_r + j s_0 \underline{\Psi}_{\delta} + j s_0 r_r I_f; \quad (18)$$

$$U_f = (r_f + j\nu_f x_{f0}) I_f + j\nu_f x_{fp} I_r; \quad (19)$$

$$\Psi_\delta = x_{\sigma\delta} (I + I_r); \quad (20)$$

$$M_D = \text{Re} j(\Psi_\delta \dot{I}); \quad (21)$$

$$M_B = \text{Re} j(I_f \dot{I}_r) k_p x_p; \quad (22)$$

где  $x_{\sigma\delta}$ ,  $x_{\sigma\delta\delta}$ ,  $x_p$  — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток якоря, ротора БВД и статора В;  $x_{rB}$  — полное индуктивное сопротивление ротора В.

Из векторной диаграммы  $\Psi_\delta = -j\Psi_\delta e^{-j\theta}$ . Здесь  $\theta$  — угол нагрузки БВД (угол между векторами напряжения и результирующей ЭДС якоря).

Решение системы уравнений (17)–(22) позволяет найти токи в обмотках двигателя:

а) якоря БВД:

$$I = \frac{U \lg \varphi}{r \sin(\varphi + \theta') + \nu x \cos(\varphi + \theta');} \quad (23)$$

б) роторов каскада:

$$I_r = -[\Psi_\delta \sin \theta' / x_{\sigma\delta} + I \cos \varphi] - j[\Psi_\delta \cos \theta' / x_{\sigma\delta} + I \sin \varphi]; \quad (24)$$

в) статора В:

$$I_f = \frac{1}{x_p} \left\{ \Psi_\delta \sin \theta' - \left[ \frac{r_f}{x_0} \cos \theta + (x_{\sigma\delta\delta} + x_{rB} \sin \theta) I_r + \Psi_\delta \cos \theta' + \left( \frac{r_f}{x_0} \sin \theta - (x_{\sigma\delta\delta} + x_{rB} \cos \theta) I_r \right) \right] \right\}; \quad (25)$$

где углы  $\theta$  и  $\theta'$  связаны между собой соотношением:

$$\cos(\varphi + \theta') = \frac{x_{\sigma\delta} I}{\Psi_\delta} \cos(\varphi + \theta).$$

Частота напряжения и тока якоря БВД [4]:

$$\nu = \frac{-r \Psi_\delta (\sin \theta' + \cos \theta' \lg \varphi) - x_{\sigma\delta} U + \sqrt{r^2 \Psi_\delta^2 (\sin \theta' + \cos \theta' \lg \varphi)^2 - x_{\sigma\delta}^2 U^2 + \sqrt{4x_{\sigma\delta} \Psi_\delta (\cos \theta' - \sin \theta' \lg \varphi) U \lg \varphi}}{2x_{\sigma\delta} \Psi_\delta (\cos \theta' - \sin \theta' \lg \varphi)}; \quad (26)$$

Электромагнитные вращающие моменты БВД и В [4], [6]:

$$M_D = \frac{\nu \Psi_\delta [0,5 \sin 2\theta' - \sin^2 \theta' \lg \varphi]}{r \lg \varphi + \nu x_{\sigma\delta}}; \quad (27)$$

$$M_B = k_p (M_D - r_f I_f^2 / s_0),$$

причем последнее выражение совпадает с (12).

Подставив (23), (24), (27) в выражение (13), получим развернутое выражение электромагнит-

ного момента двигателя:

$$M_{\text{БВД}} = (1 + k_p) \frac{\nu \Psi_\delta^2 [0,5 \sin 2\theta' - \sin^2 \theta' \lg \varphi]}{r \lg \varphi + \nu x_{\sigma\delta}} - k_p \frac{r_f}{x_0} \left[ \left( \frac{\Psi_\delta}{x_p} \sin \theta' + \frac{A}{x_0} \right)^2 + \left( \frac{\Psi_\delta}{x_p} \cos \theta' + \frac{A \lg \varphi}{x_0} \right)^2 \right]; \quad (28)$$

где  $A = rU - (r \cos \theta' - \nu x_{\sigma\delta} \sin \theta') \nu \Psi_\delta$ ;  $x_0^2 = r^2 + \nu^2 x_{\sigma\delta}^2$ .

При допущении  $r=0$

$$M_{\text{БВД}} = (1 + k_p) \frac{\Psi_\delta^2 [0,5 \sin 2\theta' - \sin^2 \theta' \lg \varphi]}{x_{\sigma\delta}} - \frac{k_p r_f \Psi_\delta^2}{x_0} \left[ \left( \frac{x_p + x_{\sigma\delta}}{x_p x_{\sigma\delta}} \right)^2 \sin^2 \theta' + \left( \frac{1}{x_p} \cos \theta' + \frac{\lg \varphi}{x_{\sigma\delta}} \sin \theta' \right)^2 \right]; \quad (29)$$

Из последнего выражения следует, что при  $r=0$  вращающий момент БВД не зависит от напряжения и частоты тока якоря БВД.

Критическое значение угла нагрузки  $\theta'_{\text{кр}}$ , соответствующее максимальной величине  $M_{\text{БВД}}$ ,

$$\lg 2\theta'_{\text{кр}} = \frac{1 + k_p (1 - 2r_f \lg \varphi / s_0 x_p)}{\lg \varphi + k_p \left[ \lg \varphi + \frac{r_f}{x_0} \left( \frac{2}{x_p} + \frac{1}{x_{\sigma\delta} \cos^2 \varphi} \right) \right]}. \quad (30)$$

При поддержании  $\Psi_\delta = \text{const}$  рассматриваются два варианта БВД: с постоянной частотой тока возбуждения  $\nu_f = \text{const}$  ( $s_0 = \text{var}$ ) и с постоянной частотой тока ротора  $s_0 = \text{const}$  ( $\nu_f = \text{var}$ ).

Рабочие и угловые характеристики БВД с  $\Psi_\delta = 1$ ,  $\nu_f = 0,1$  и  $\varphi = 0$  (рис. 2,а,б) свидетельствуют о следующем:

1. Скоростные характеристики БВД подобны аналогичным характеристикам компенсированного ДПТ независимого возбуждения и практически абсолютно жесткие.

2. Электромагнитный вращающий момент В в номинальном режиме БВД с  $\nu_f = 0,1$  составляет 21,6% номинального момента БВД.

3. Активная мощность возбуждения отрицательна ( $P_f < 0$ ) так же, как и при  $\Psi_\delta = \text{const}$ .

4. Предельный электромагнитный момент БВД с  $\nu_f = 0,1$  (рис. 2,б), ограниченный насыщением В, при котором невозможно дальнейшее поддержание  $\Psi_\delta = 1$ , достигает значения 3,82 ( $M_D = 3,42$ ;  $M_B = 0,4$ ) при угле нагрузки  $\theta' = 29^\circ 40'$ . Максимальное значение момента БВД, соответствующее критическому углу нагрузки (30)  $\theta'_{\text{кр}} = 39^\circ 05'$  при  $\Psi_\delta = 1$ ,  $M_{\text{БВД}} = 4,76$ .

Второй вариант БВД с  $\Psi_\delta = \text{const}$  при поддержании  $s_0 = \text{const}$  ( $\nu_0 = 0,1$ ) и  $\varphi = 0$  (рис. 3,а,б) характеризуется следующим.

1. Скоростные характеристики БВД с  $s_0 = 0,1$  также подобны аналогичным характеристикам компенсированного ДПТ независимого возбуждения.

2. Электромагнитный вращающий момент В в номинальном режиме БВД с  $s_0 = 0,1$  меньше,

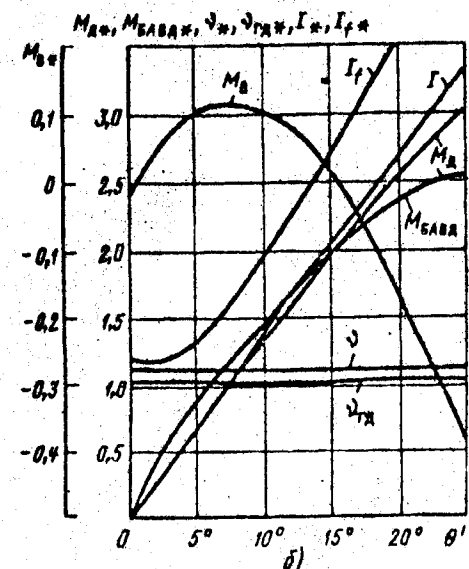
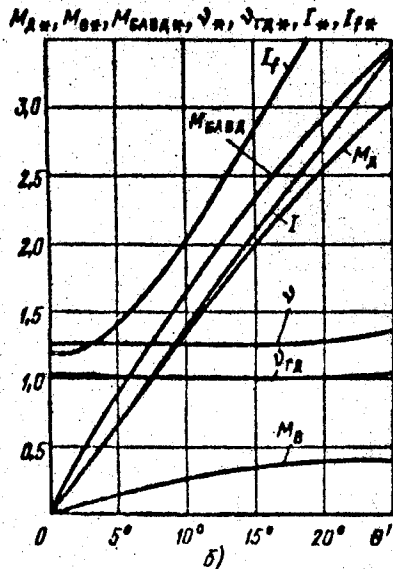
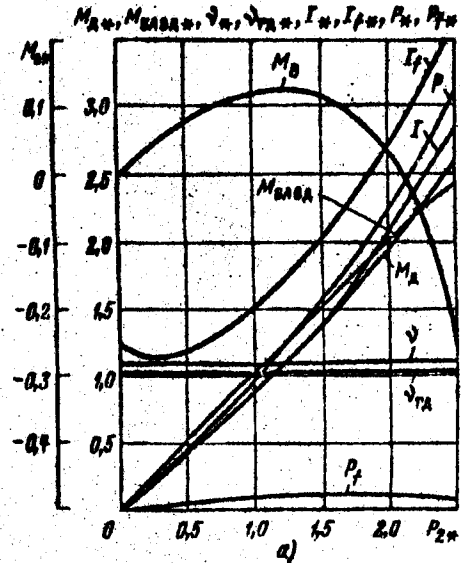
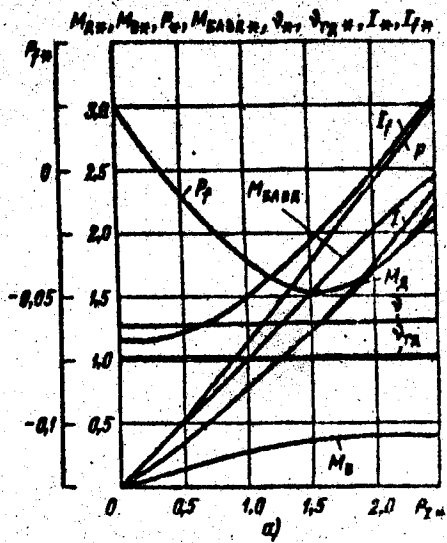


Рис. 2. Характеристики БАВД при  $s_0 = \text{const}$  и  $\Psi_\delta = \text{const}$ ;

а — рабочие  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi$ ,  $I_f$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f=f(P_2)$ ;  
 б — угловые  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi$ ,  $I_f$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f=f(\theta)$

Рис. 3. Характеристики БАВД при  $s_0 = \text{const}$  и  $\Psi_\delta = \text{const}$ ;

а — рабочие  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi$ ,  $I_f$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f=f(P_2)$ ;  
 б — угловые  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi$ ,  $I_f$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f=f(\theta)$

чем у БАВД с  $v_f=0,1$ , и составляет 12,9% номинального момента АД.

3. Отсутствует транзит активной мощности из цепи якоря АД в цепь статора В, и, следовательно,  $P_f > 0$ . Последнее обусловлено изменением направления вращения магнитного поля статора В.

4. Предельный электромагнитный момент БАВД при  $s_0=0,1$  (рис. 3, б) по условиям насыщения В меньше, чем при  $v_f=0,1$ , вследствие того, что момент В при больших нагрузках изменяет свой знак из-за большего значения тормозного асинхронного момента В  $M_A = -r_f^2/s_0$  при меньшем значении  $s_0$ . Так, при  $\theta = 26^\circ 20'$   $M_{A(AD)} = 2,56$  ( $M_D = 3,17$  и  $M_B = -0,59$ ). При критическом угле нагрузки  $\theta' = 26^\circ 05'$  и  $\Psi_\delta = 1$   $M_{A(AD)} = 2,6$ , в то время как у АД  $M_{A(AD)max} = 4$ . Таким образом, перегрузочная спо-

собность БАВД при  $s_0=0,1$  ниже аналогичной АД и БАВД с  $v_f=0,1$ .

Следует отметить, что БАВД с  $\Psi_\delta = \text{const}$  и  $s_0 < 0$  нерационален, так как полная мощность В превышает мощность АД из-за противокомпаундного характера его возбуждения. Из обобщенного выражения электромагнитного вращающего момента  $M = \Psi_\delta I \sin(\alpha_{\Psi_\delta, I})$  следует, что оптимальным вариантом АД по пусковым и перегрузочным характеристикам является вариант АД с ортогональным векторным управлением  $\Psi_\delta \perp I$  [4]. При этом обеспечивается наилучшее использование активных материалов машины. Указанный вариант АД возможен только с поддержанием угла  $\varphi = -\theta'$  и, следовательно, не является полным аналогом ДПТ.

Естественно, представляет интерес БАВД с ортогональным управлением как при поддержании  $v_f = \text{const}$ , так и  $s_0 = \text{const}$ .

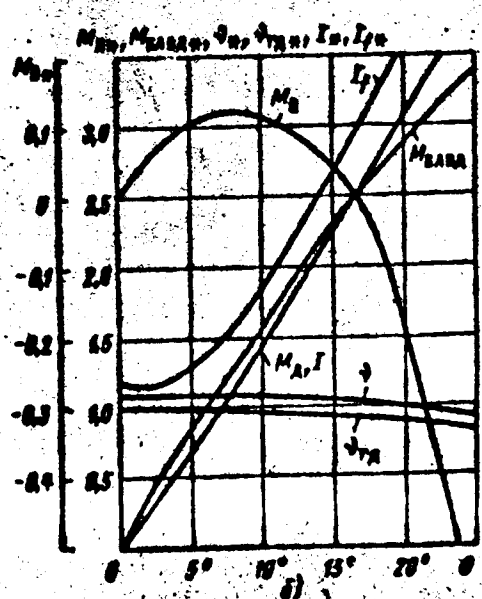
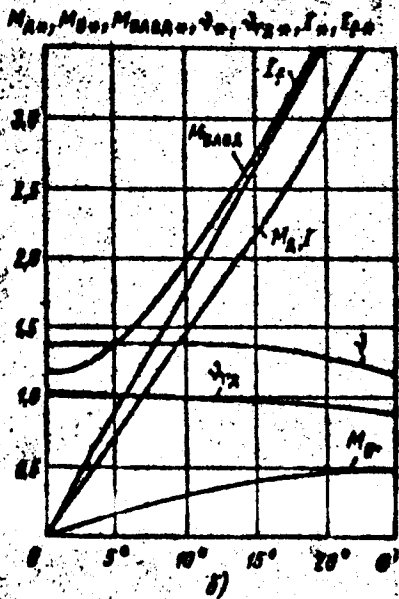
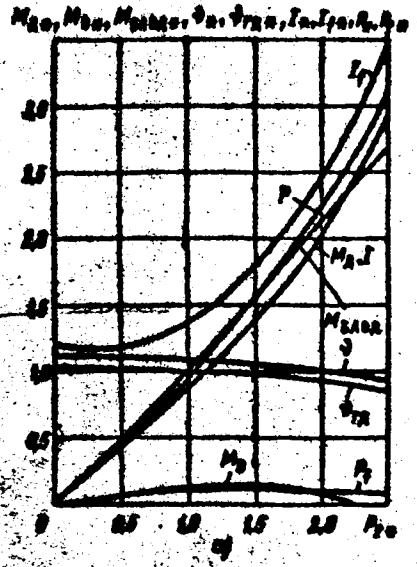
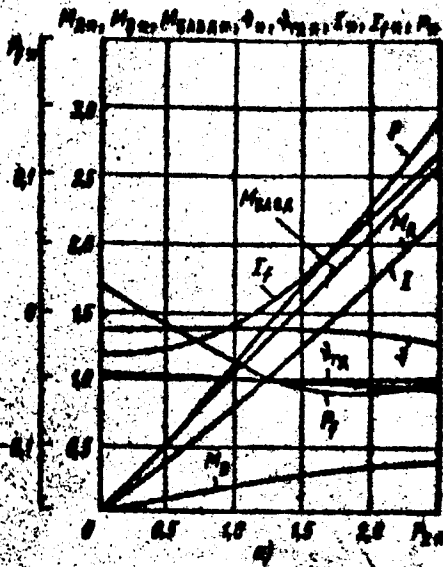


Рис. 4. Характеристики БВД при  $v_f = \text{const}$ ,  $\varphi = -\theta'$ ,  $\Psi_D = \text{const}$ :  
 а — рабочие  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi_D$ ,  $\psi_B$ ,  $I_a$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f(P_2)$ ;  
 б — угловые  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi_D$ ,  $\psi_B$ ,  $I_a$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f(P_2)$ .

Рис. 5. Характеристики БВД при  $z_0 = \text{const}$ ,  $\varphi = -\theta'$ ,  $\Psi_D = \text{const}$ :  
 а — рабочие  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi_D$ ,  $\psi_B$ ,  $I_a$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f(P_2)$ ;  
 б — угловые  $M_D$ ,  $M_B$ ,  $M_{BAVD}$ ,  $\psi_D$ ,  $\psi_B$ ,  $I_a$ ,  $I_r$ ,  $P$ ,  $P_f(P_2)$ .

В рассматриваемом случае БВД угловая частота напряжения якоря и электромагнитный вращающий момент АД соответственно равны:

$$v = \frac{U \cos \theta' [1 + \sqrt{1 - 4 \Psi_D^2 \lg^2 \theta' / (x_u U \cos \theta')}] }{2 \Psi_D}; \quad (31)$$

$$M_D = \frac{\Psi_D^2 \lg \theta'}{-r \lg \theta' + ix}; \quad (32)$$

При допущении  $r=0$

$$M_{D1} = \frac{\Psi_D^2 \lg \theta'}{x_u}; \quad (35)$$

откуда следует, что перегрузочная способность АД и, следовательно, БВД теоретически неограниченна.

Особенности режимов работы БВД с ортогональным управлением  $\Psi_D = \text{const}$  ( $\Psi_D = 1$ ) и под-

держанием либо  $v_f = 0,1$ , либо  $z_0 = 0,1$  (рис. 4, 5):

1. Скоростные характеристики БВД имеют отрицательную жесткость, уменьшающуюся с нагрузкой, что обусловлено возрастающим углом  $\varphi = -\theta'$  и, следовательно, намагничивающей реакцией якоря.

2. Моментные характеристики БВД с  $\varphi = -\theta'$ ;  $\Psi_D = 1$  и  $v_f = 0,1$  или  $z_0 = 0,1$  при одинаковых значениях угла нагрузки соответствуют большим значениям вращающего момента при меньших токах обмоток В, чем в БВД при  $\Psi_D = 1$  с соответствующим поддержанием либо  $v_f = 0,1$ , либо  $z_0 = 0,1$ .

3. В варианте БВД с  $\varphi = -\theta'$  и  $v_f = 0,1$  в основном диапазоне нагрузки активная мощность статора  $P_f < 0$ , а при  $z_0 = 0,1$  —  $P_f > 0$ .

4. Из рис. 4, 5 следует, что при ортогональном управлении БВД обеспечивает наибольшую пе-

регрузочную способность. Так, при  $v_f=0,1$  и максимальном угле нагрузки по условиям насыщения  $B$   $\theta'=38^\circ 30'$   $M_{\text{БАВД}}=7,15$  ( $M_{\text{Д}}=7,4$  и  $M_{\text{В}}=-0,25$ ), а при  $s_0=0,1$   $\theta'=28^\circ 20'$ ;  $M_{\text{БАВД}}=3,65$  ( $M_{\text{Д}}=4,81$  и  $M_{\text{В}}=-1,16$ ). Причем при максимальных значениях электромагнитного вращающего момента БАВД в его обоих вариантах активная мощность  $B$   $P_f > 0$ .

5. Электромагнитный вращающий момент  $B$  в номинальном режиме БАВД при  $v_f=0,1$  составляет 22% номинального момента АД, в то время как при  $s_0=\text{const}$  он не превышает 14%.

Характерным недостатком этого типа БАВД является некоторое снижение коэффициента мощности АД с ростом нагрузки, так как угол  $\varphi = -\theta'$ .

Общей особенностью рассмотренных вариантов БАВД является то, что в связи с повышенной частотой скольжения базовой машины АД его номинальный режим может быть обеспечен только при повышенном напряжении обмотки якоря у БАВД с  $v_f=0,1$  при  $s_0=0,35$  в пределах  $U=1,36+1,39$ , а при  $s_0=0,1$  соответственно  $U=1,11+1,13$ . При этом одновременно с повышением полной мощности АД с увеличением скольжения увеличивается полная мощность возбуждателя. Следовательно, при одной и той же номинальной мощности БАВД его расчетная мощность минимальна при поддержании  $s_0=\text{const}$  ( $s_0=0,1$ ).

## Вывод

Анализ и сравнение рабочих и угловых характеристик рассмотренных вариантов БАВД показывает, что при заданной номинальной мощности АД оптимальным вариантом по использованию активных материалов машины каскада и перегрузочной способности является БАВД с поддержанием неизменного результирующего магнитного потока АД  $\Psi_a = \text{const}$  и ортогональности векторов данного потока и тока якоря  $\Psi_a - I$ .

## Список литературы

1. А.с. 1561163 (СССР). Бесконтактный асинхронизированный вентильный электродвигатель / Ю.П. Сонин, Ю.Г. Шакарян, С.А. Юшков и др. // Открытия. Изобретения. 1990. № 16.
2. А.с. 1636949 (СССР). Электропривод переменного тока / Ю.П. Сонин, С.А. Юшков, Ю.И. Прусаков // Открытия. Изобретения. 1991. № 13.
3. Сонин Ю.П. Статические характеристики машины двойного питания в режиме вентильного двигателя // Электричество. 1985. № 4. С. 60-62.
4. Сонин Ю.П., Прусаков Ю.И. Перегрузочная способность машины двойного питания в режиме вентильного двигателя // Электричество. 1988. 1988. № 3. С. 57-60.
5. Сонин Ю.П., Прусаков Ю.И. Пусковые характеристики машины двойного питания в режиме вентильного двигателя // Электричество. 1988. № 3. С. 61-65.
6. Сонин Ю.П., Юшков Ю.И., Прусаков Ю.И. Бесконтактный асинхронизированный вентильный двигатель // Электричество. 1989. № 11. С. 41-46.