

П. А. КЯЛЯН

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА БЕСКОНТАКТНОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. БЕСКОНТАКТНАЯ МАШИНА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ (БМДП)

Слежение за планетами и искусственными небесными телами, скорости которых резко отличаются друг от друга, предъявляет к электроприводу системы часового ведения телескопа определенные требования. Одним из них является обеспечение широкого диапазона изменения скорости вращения ротора с высокой стабильностью при всех ее значениях. В настоящее время в качестве электродвигателя для привода часового ведения используются синхронные двигатели, скорость которых регулируется изменением частоты напряжения статорной обмотки. Однако такой метод регулирования скорости имеет известные недостатки — малый диапазон изменения скорости вращения и непостоянный момент на валу.

В последнее время все большее внимание уделяется исследованию управляемой машины переменного тока [1]. Такая машина, работая в режиме двигателя, может обеспечить в широких пределах изменение скорости вращения ротора с заданной точностью и неизменным моментом на валу. Может оказаться, что использование такого двигателя в астроприборостроении позволит по-новому решить ряд вопросов и упростить кинематические схемы приводов. Так, например, в некоторых случаях может оказаться целесообразным заменить существующие в настоящее время две системы — наводки и тонкой коррекции одной системой с одним двигателем, что значительно упростит кинематику телескопа по осям α и δ .

Специальные установки, требующие высокую степень надежности системы, стремление упростить условия эксплуатации и увеличить срок службы машин способствуют широкому внедрению бесконтактных электрических машин. Настоящая статья посвящена исследованию бесконтактной управляемой машины переменного тока (БУМПТ).

БУМПТ состоит из двух основных компонентов — системы автоматического управления (САУ) и самой бесконтактной машины двойного питания (БМДП). САУ состоит из регулятора, формирующего требуемый закон управления, и силового элемента (преобразователя частоты), усиливающего по мощности сигнал управления регулятора и воздействующего непосредственно на обмотку управления БУМПТ.

БМДП конструктивно может быть представлена в виде каскада из двух асинхронных машин с разным ротором (рис. 1), [2]. Роторы машин соединены механически и вращаются с одинаковой угловой скоростью. Обмотки роторов соединены электрически таким образом, чтобы их магнитные поля вращались в противоположных направлениях. Машину, статорная обмотка которой присоединена к сети, будем называть основной машиной,

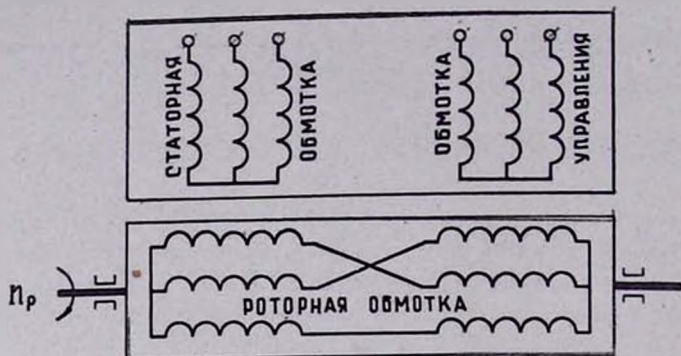


Рис. 1. Принципиальная схема БМДП.

вторую — вспомогательной. Статорная обмотка основной машины названа статорной обмоткой БМДП, а статорная обмотка вспомогательной машины — обмоткой управления. Синхронная скорость БМДП принята равной синхронной скорости основной машины. Скорость вращения ротора, при которой частота напряжения управления равна нулю (в обмотке управления протекает постоянный ток), будем называть второй синхронной скоростью. Скольжение БМДП принято равным скольжению основной машины и положительным при скорости выше синхронной. В общем случае число полюсов основной машины не равно числу полюсов вспомогательной.

Принцип работы БУМППТ следующий. При скольжениях ротора частота тока обмотки управления с помощью САУ изменяется таким образом, чтобы в роторной обмотке индуктировалась э. д. с. с частотой скольжения. При скоростях вращения ротора, меньших второй синхронной, направление вращения магнитного поля роторной обмотки совпадает с направлением вращения ротора, а при скоростях вращения ротора, превышающих вторую синхронную, она направлена против вращения ротора. В результате сложения скоростей вращения ротора и магнитного поля роторной обмотки магнитное поле в воздушном зазоре основной машины вращается относительно статора с синхронной скоростью.

В настоящей работе исследованы некоторые свойства БМДП. Амплитуда и частота напряжения статорной обмотки приняты постоянными, а угловая частота — синхронной. В этом случае угловая частота напряжения обмотки управления (ω_2), при изменении скорости вращения ротора, должна изменяться следующим образом [2]:

$$\omega_2 = h + s_1(1 + h). \quad (1)$$

Здесь $h = p_2/p_1$ — отношение числа полюсов вспомогательной машины к основной, s_1 — скольжение.

Система дифференциальных уравнений, описывающая неустойчивый режим работы БМДП в относительных единицах и в комплексной форме и записанная в синхронных осях (d, q) , имеет следующий вид [2]:

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= r_1 \bar{i}_1 + (p + j)(x_{a1} \bar{i}_1 + x_{af1} \bar{i}_{p1}); \\ 0 &= r_p \bar{i}_{p1} + (p - js_1)(x_{af1} \bar{i}_1 + x_{af2} \bar{i}_2 + x_p \bar{i}_{p1}); \\ \bar{u}_2 &= r_2 \bar{i}_2 + (p - j\omega_2)(x_2 \bar{i}_2 + x_{af2} \bar{i}_{p1}); \\ M_b &= Jps_1 + \operatorname{Re} j(x_{af1} \bar{i}_1 \bar{i}_{p1} + x_{af2} \bar{i}_2 \bar{i}_{p1}). \end{aligned} \quad (2)$$

В этой системе первое уравнение представляет уравнение статорной обмотки, второе — уравнение роторной обмотки, третье — уравнение обмотки управления и четвертое — уравнение моментов или уравнение движения.

Приняты следующие обозначения, в которых к параметрам основной машины приписан индекс (1), вспомогательной — индекс (2), ротору — индекс (p), взаимным параметрам статора и ротора — индекс (af):

$p = d/dt$ — оператор дифференцирования;

$\bar{u}, \bar{i}$ — векторы напряжений и токов;

r, x — активные и индуктивные сопротивления;

M_b, M_s — механический и электромагнитный моменты;

J — момент инерции ротора;

s_1 — скольжение;

ω — угловая частота напряжения обмотки.

Система уравнений (1) нелинейна, и ее общее решение в аналитической форме представить не удастся. Однако она обратится в линейную и может быть решена аналитически, если частоты напряжений статорной обмотки и обмотки управления, а также скорость вращения ротора постоянны. При таком допущении $Jps_1 = 0$ и уравнение движения принимает следующий вид:

$$M_b = M_s = \operatorname{Re} j(x_{af1} \bar{i}_1 \bar{i}_{p1} + x_{af2} \bar{i}_2 \bar{i}_{p1}). \quad (3)$$

Примером такого случая может служить работа БУМПТ в генераторном режиме с приводом несоизмеримо большой мощности.

Исследуем нормально установившийся режим работы бесконтактной машины двойного питания, работающей с переменной скоростью вращения. Систему уравнений, описывающую такой режим работы БМДП, можно получить из (1), полагая в ней $p = 0$. В машинах переменного тока при частоте 50 Гц и выше величиной активного сопротивления статорной обмот-

ки можно пренебречь. Такое допущение общепринято. Оно позволяет упростить выражения параметров режима и дает приемлемые на практике результаты расчетов [1].

Пологая в (1) $p=0$, $r_1=0$, получим:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= j(x_1 \bar{I}_1 + x_{a1} \bar{I}_{p1}); \\ 0 &= r_p \bar{I}_{p1} - js_1(x_{a1} \bar{I}_1 + x_{a2} \bar{I}_2 + x_p \bar{I}_{p1}); \\ \bar{U} &= r_2 \bar{I}_2 - j\omega_2(x_2 \bar{I}_2 + x_{a2} \bar{I}_{p1}); \\ M_b &= M_s = \operatorname{Re} j(x_{a1} \bar{I}_1 \bar{I}_{p1} + x_{a2} \bar{I}_2 \bar{I}_{p1}).\end{aligned}\tag{4}$$

На основе (4) можно построить векторные диаграммы статорной обмотки, роторной обмотки и обмотки управления. На рис. 2 приведены векторные диаграммы для генераторного ($P_1 > 0$, $Q_1 > 0$) и двигательного ($P_1 < 0$, $Q > 0$) режимов работы. При построении предполагалось, что $s_1 < 0$, а $\omega_2 > 0$.

Выражения, определяющие параметры нормального установившегося режима работы БМДП—токи, потери, моменты и мощности, приведены в табл. 1. Они получены из системы (1) и представлены через параметры режима статорной обмотки (U_1 , P_1 , Q_1) и конструктивные параметры машины. Простоты ради вектор напряжения статорной обмотки ($\bar{U}_1$) принят совпадающим с действительной осью (q_c) используемой системы координатных осей ($d_c q_c$), т. е. $\delta_0 = 0$ и $\bar{U}_1 = U_1$. Полученные выражения могут быть использованы для расчета параметров режима при работе БМДП с произвольным характером изменения нагрузки статорной обмотки.

На рис. 3 и 4 приведены графики, иллюстрирующие изменение параметров режима в зависимости от скорости вращения ротора. Для облегчения анализа и выявления характерных особенностей машины они построены для случая, когда режим нагрузки статорной обмотки неизменный и не зависит от изменения скорости вращения ротора. Такой режим нагрузки является основным для генераторного режима работы и встречается во многих механизмах.

В качестве конструктивных параметров БМДП в работе использованы параметры установки, смонтированной из двух стандартных асинхронных машин с разным ротором типа АК2-102-4: $r_1 = r_2 = 0,0165$, $x_1 = x_2 = 2,81$, $T_1 = T_2 = 171$, $x_1 = x_2 = 0,226$, $\mu_1 = \mu_2 = 0,774$, $r_p = 0,0272$, $x_p = 5,66$, $T_p = 152,5$, $x_{a1} = x_{a2} = 2,48$, $h = 1$.

Из полученных графиков видно, что токи, а следовательно, и потери активной мощности в статорной и роторной обмотках не зависят, а в обмотке управления практически не зависят от изменения скорости вращения ротора. Следовательно, потери в обмотках БМДП, работающей с переменной скоростью вращения, будут равны потерям в обмотках аналогичной бесконтактной машины, работающей с постоянной скоростью вращения и

СТОЯТОР	$\bar{S}_1 = p_1 + jq_1 = \bar{U}_1 \bar{I}_1$ $\bar{I}_1 = \frac{1}{U_1} (p_1 - jq_1)$ $I_1 = \frac{1}{U_1} \sqrt{p_1^2 + q_1^2}$ $\varphi_1 = \arctg \frac{q_1}{p_1}$
РОТОР	$\bar{I}_{r1} = \bar{I}_{r2} = -\frac{x_1}{x_{\sigma r1} U_1} \left[p_1 - j \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right) \right]$ $I_{r1} = I_{r2} = \frac{x_1}{x_{\sigma r1} U_1} \sqrt{p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2}$ $\Delta p_1 = \frac{x_1}{\mu_1 T_1 U_1^2} \left[p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2 \right]$
УПРАВЛЕНИЕ	$\bar{I}_2 = \frac{T_2 X_1}{S_1 X_{\sigma r1} X_{\sigma r2} U_1} \left\{ \left(\frac{U_1^2}{x_1} + S_1 T_2 G_1 p_1 + q_1 \right) + j \left[p_1 - S_1 T_2 G_1 \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right) \right] \right\}$
	$I_2 = \frac{T_2 X_1}{X_{\sigma r1} X_{\sigma r2} U_1 \sqrt{S_1^2}} \sqrt{p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2 + S_1^2 T_2^2 G_1^2 \left[p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2 \right] - \frac{2}{x_1} S_1 \mu_1 T_2 U_1^2 p_1}$
	$\Delta p_2 = \frac{x_1}{S_1^2 \mu_1 \mu_2 T_2^2 U_1^2} \left\{ p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2 + S_1^2 T_2^2 G_1^2 \left[p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2 \right] - \frac{2}{x_1} S_1 \mu_1 T_2 U_1^2 p_1 \right\}$
	$I_{12} = M_{11} - \frac{x_1}{S_1 \mu_1 T_2 U_1^2} \left[p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2 \right] = p_1 - \frac{\Delta p_2}{S_1}$ $M_{11} = p_1$
	$-\bar{U}_2 = \frac{T_2 T_2}{S_1 X_{\sigma r1} X_{\sigma r2} U_1} \left\{ \left[(1 - S_1 \omega_2 T_2 G_2) U_1^2 + x_1 \left[(S_1 T_2 G_1 + \omega_2 T_2) p_1 + (1 - S_1 \omega_2 T_2 G_1) \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right) \right] \right] - \right. \\ \left. - j \left[(S_1 T_2 + \omega_2 T_2) U_1^2 - x_1 \left[(1 - S_1 \omega_2 T_2 G_1) \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right) - (S_1 T_2 G_1 + \omega_2 T_2) q_1 \right] \right] \right\}$
В ОБОИХ	$U_2 = \frac{T_2 T_2}{X_{\sigma r1} X_{\sigma r2} \sqrt{S_1^2}} \sqrt{\left[(1 - S_1 \omega_2 T_2 G_2)^2 + (S_1 T_2 + \omega_2 T_2)^2 \right] U_1^4 - 2 S_1 X_1 T_2 \mu_1 (1 - S_1 \omega_2 T_2 G_2) + \omega_2^2 T_2^2 p_1^2 + \frac{x_1^2}{U_1^2} \left[(1 - S_1 \omega_2 T_2 G_1) \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right) + (S_1 T_2 G_1 + \omega_2 T_2) \right] (p_1^2 + q_1^2) + 2 X_1 [(1 + 2 S_1 \omega_2 T_2 G_2) \mu_2 + S_1^2 T_2^2 G_2] + \omega_2^2 T_2^2 (1 + S_1^2 T_2^2 G_2) (G_1 - \mu_2) \right] q_1}$
	$\alpha = \arctg \frac{-(S_1 T_2 + \omega_2 T_2) U_1^2 + x_1 [(1 - S_1 \omega_2 T_2 G_1) p_1 - (S_1 T_2 G_1 + \omega_2 T_2) q_1]}{(1 - S_1 \omega_2 T_2 G_2) U_1^2 + x_1 [(S_1 T_2 G_1 + \omega_2 T_2) p_1 + (1 - S_1 \omega_2 T_2 G_1) \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)]}$
	$p_2 = -\frac{1}{S_1^2 X_1 \mu_1 \mu_2 T_2^2} \left[\left[(1 + S_1 \omega_2 T_2 G_2) \mu_2 + S_1^2 T_2^2 \right] U_1^4 - S_1 X_1 T_2 \mu_1 (2 + S_1 \omega_2 T_2 G_2) p_1 + \right. \\ \left. + 2 X_1 (1 + S_1 \omega_2 T_2 G_2) \mu_2 + S_1^2 T_2^2 G_2 \right] q_1 + \frac{x_1^2}{U_1^2} (1 + S_1 \omega_2 T_2 G_2) \mu_2 + S_1^2 T_2^2 G_2^2 (p_1^2 + q_1^2) \right]$
БМДП В ЦЕПЕ	$Q_2 = \frac{ w_2 }{S_1^2 X_1 \mu_1 \mu_2 T_2^2} \left[(1 + S_1^2 T_2^2 G_2) U_1^4 - 2 S_1 X_1 T_2 \mu_1 p_1 + x_1 [2 + S_1^2 T_2^2 (G_2 + G_1 - \mu_2)] q_1 + \right. \\ \left. + \frac{x_1^2}{U_1^2} [1 + S_1^2 T_2^2 G_2 (G_1 - \mu_2)] (p_1^2 + q_1^2) \right]$
	$M_2 = M_{21} + M_{22} = 2 M_{12} - \frac{x_1}{S_1 \mu_1 T_2 U_1^2} \left[p_1^2 + \left(\frac{U_1^2}{x_1} + q_1 \right)^2 \right] = 2 p_1 - \frac{\Delta p_2}{S_1}$
	$p = p_1 + p_2 = -\frac{1}{S_1^2 X_1 \mu_1 \mu_2 T_2^2} \left[(1 + S_1 \omega_2 T_2 G_2) \mu_2 + S_1^2 T_2^2 \right] U_1^4 - S_1 X_1 T_2 \mu_1 [2 + S_1 \omega_2 T_2 G_2 (1 + \omega_2)] p_1 + \\ + 2 X_1 (1 + S_1 \omega_2 T_2 G_2) \mu_2 + S_1^2 T_2^2 G_2 q_1 + \frac{x_1^2}{U_1^2} (1 + S_1 \omega_2 T_2 G_2) \mu_2 + S_1^2 T_2^2 G_2^2 (p_1^2 + q_1^2) \right]$
	$p_0 = p_1 + p_2 + \Delta p_1 + \Delta p_2 = (1 + S_1) (M_{21} + h M_{22}) = (1 + S_1) \left[(1 + h) p_1 - \frac{h}{S_1} \Delta p_1 \right]$

имеющей одинаковые с БМДП конструктивные параметры и режим нагрузки статорной обмотки.

Напряжение обмотки управления при изменении скорости вращения ротора изменяется по V-образной кривой. Величину скольжения, при которой напряжение управления достигает минимума, можно найти из условия $dU_2/ds_1 = 0$. Практически она достигает минимума при скольжении ротора $s_1 = s_0 = -h/(1+h)$, когда в обмотке управления течет постоянный

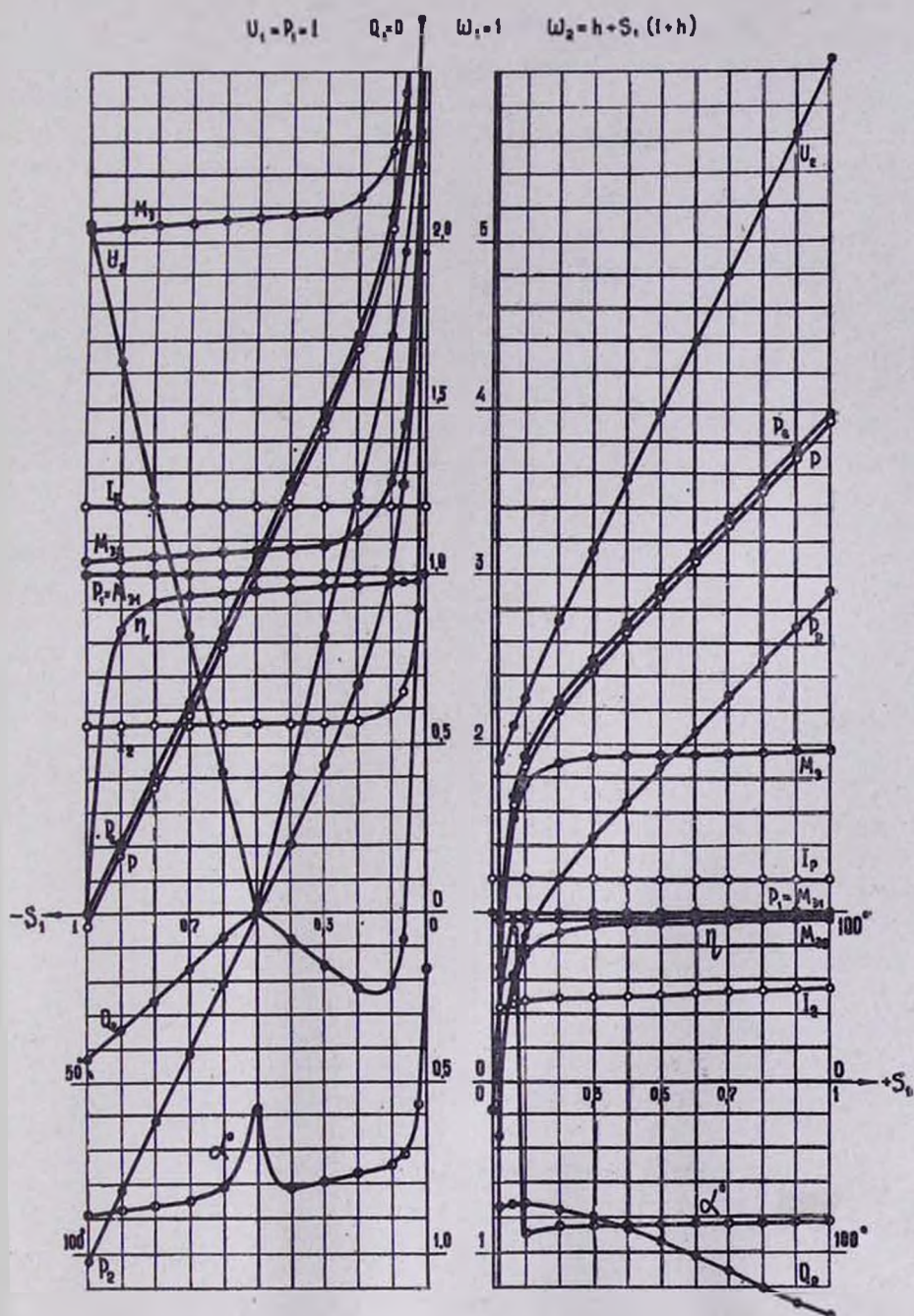


Рис. 3. Расчетные характеристики БМП (генераторный режим).

$$U_1 = P_1 = 1 \quad Q_1 = 0 \quad \omega_1 = 1 \quad \omega_2 = h + S_1(1+h)$$

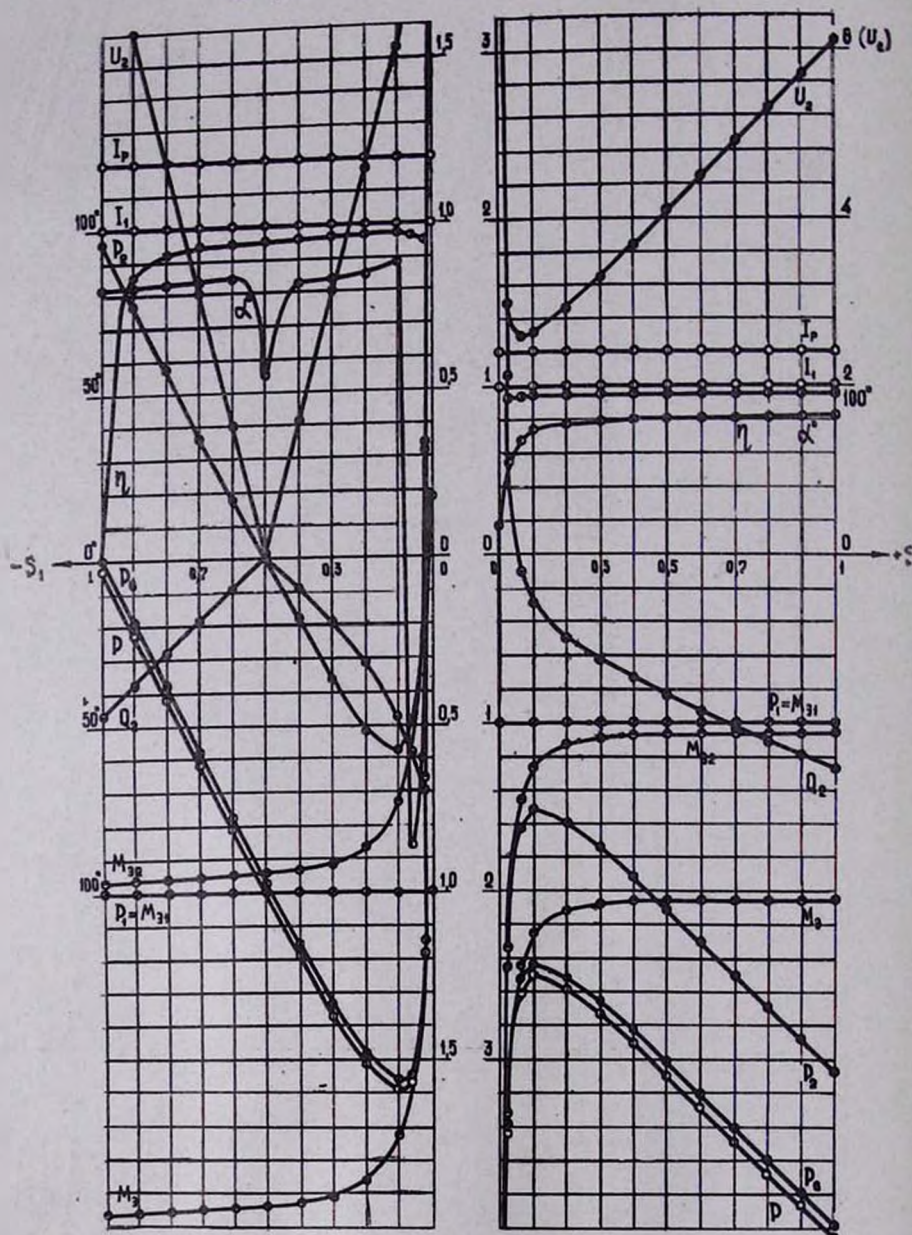


Рис. 4. Расчетные характеристики БМДП (двигательный режим).

ток ($\omega_2=0$) и реактивная мощность в обмотке управления равна нулю ($Q_2=0$). При отклонении скольжения от $S_1=S_0$ напряжение обмотки управления возрастает. Физически это объясняется тем, что увеличивается час-

тока напряжения обмотки управления, ее индуктивность и э. д. с., наведенная в ней токами ротора. Чтобы при этом сохранить требуемый ток в обмотке управления неизменным, необходимо увеличить величину напряжения обмотки управления (U_2).

При приближении величины скорости вращения ротора к синхронной напряжение, ток, активная и реактивная мощности обмотки управления (а также другие параметры режима БМДП) резко возрастают и при синхронной скорости теоретически обращаются в бесконечность. Это явление объясняется тем, что с синхронной скоростью БМДП работать не может, так как в роторной обмотке не наводится э. д. с. Практически в роторной обмотке э. д. с. не наводится в некотором интервале скоростей, близких к синхронной. Поэтому условие сохранения заданного режима нагрузки статорной обмотки неизменным приводит к резкому возрастанию параметров режима обмотки управления при приближении скорости вращения ротора к синхронной и его неограниченному возрастанию при синхронной скорости ($U_2 \rightarrow \infty$, $I_2 \rightarrow \infty$, $P_2 \rightarrow \infty$, $Q_2 \rightarrow \infty$ при $s_1 \rightarrow 0$).

При неподвижном роторе ($s_1 = -1$) параметры режима обмотки управления достигают конечной величины, а режим БМДП аналогичен режиму работы трансформатора. При работе со скоростью выше синхронной, чтобы сохранить заданный режим нагрузки статорной обмотки неизменным, приходится резко увеличивать параметры режима обмотки управления. Поэтому в качестве рабочего интервала изменения скорости вращения ротора необходимо использовать интервал от нуля до синхронной величины ($-1 < s_1 < 0$).

Характеристики БМДП как машины двойного питания определяются законами изменения напряжения статорной обмотки и обмотки управления [2]. В табл. 1 приведены формулы для расчета параметров режима в зависимости от режима нагрузки статорной обмотки. Выражения, определяющие параметры режима БМДП в зависимости от напряжений статорной обмотки ($\bar{U}_1$), обмотки управления ($\bar{U}_2$) и угла между ними (α), приведены в табл. 2. Из этой таблицы видно, что выражения момента и активной мощности БМДП в целом состоят из трех слагаемых. Первое и второе слагаемое соответственно обуславливаются квадратом напряжений статорной обмотки (U_1^2) и обмотки управления (U_2^2) и, как принято в теории управляемой машины переменного тока с контактными кольцами, могут быть названы асинхронными составляющими [2].

Третье слагаемое обуславливается произведением напряжений статорной обмотки и обмотки управления, а также углом между ними и может быть названо синхронной составляющей.

На рис. 5 приведены некоторые расчетные характеристики параметров режима БМДП. Они построены с учетом выражений, приведенных в табл. 2 при изменении скорости вращения ротора от нуля до двойной синхронной величины. Модули напряжений статорной обмотки и обмотки управления приняты равными единице ($U_1 = U_2 = 1$), а угол между ними

ВЫСОТА УКЛОНОВ	$\bar{I}_1 = -\frac{S_1 T_2 \mu_1}{X_1 A} (1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + \omega_2^2 T_2^2) \bar{U}_1 - j \frac{1}{X_1 A} \left\{ (1 + 2 S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + S_1^2 T_2^2 \epsilon) + \omega_2^2 T_2^2 [1 + S_1^2 T_2^2 \epsilon (\bar{G}_1 - \mu_2)] \right\} \bar{U}_1 + \frac{S_1 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) - j [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \bar{U}_2$
	$I_1 = T_2 T_1 \sqrt{\frac{1}{X_1 A} \left\{ [(1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 \bar{G}_1) + (\omega_2 T_2 + S_1 T_1)^2] U_1^2 + \frac{1}{2} S_1^2 X_1 T_2 T_1 \mu_2 U_1 U_2 + 2 \frac{S_1 X_{021} X_{022}}{T_2 T_1 A} [(1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 \bar{G}_1) \cos \alpha + (\omega_2 T_2 + S_1 T_1) \sin \alpha] U_1 U_2 \right\}}$
	$P_1 = \frac{S_1 T_2 \mu_1}{X_1 A} (1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + \omega_2^2 T_2^2) U_1^2 - \frac{S_1 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) \cos \alpha - [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \sin \alpha U_1 U_2$
	$Q_1 = -\frac{1}{X_1 A} \left\{ (1 + 2 S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + S_1^2 T_2^2 \epsilon) + \omega_2^2 T_2^2 [1 + S_1^2 T_2^2 \epsilon (\bar{G}_1 - \mu_2)] \right\} U_1^2 - \frac{S_1 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) \sin \alpha + [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \cos \alpha U_1 U_2$
	$M_{11} = \frac{S_1 T_2 \mu_1}{X_1 A} (1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + \omega_2^2 T_2^2) U_1^2 - \frac{S_1 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) \cos \alpha - [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \sin \alpha U_1 U_2$
УБЫТОК УКЛОНОВ	$\bar{I}_{11} = \bar{I}_{12} = \frac{S_1 X_{021}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) \left\{ (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) - [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \right\} \bar{U}_1 - \frac{S_1 X_{022}}{T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) - j [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \bar{U}_2$
	$I_{11} = I_{12} = \sqrt{\frac{S_1^2}{X_1 T_2 T_1 A} \left\{ T_2 T_1 \mu_1 (1 + \omega_2^2 T_2^2) U_1^2 + X_1 X_2 T_2 T_1 \mu_2 U_2^2 + 2 X_{021} X_{022} (\sin \alpha - \omega_2 T_2 \cos \alpha) U_1 U_2 \right\}}$
	$P_{11} = S_1 R \quad \Delta P_{11} = \frac{S_1^2}{X_1 T_2 T_1 A} [X_2 T_2 \mu_1 (1 + \omega_2^2 T_2^2) U_1^2 + X_1 X_2 T_2 T_1 \mu_2 U_2^2 + 2 X_{021} X_{022} (\sin \alpha - \omega_2 T_2 \cos \alpha) U_1 U_2]$
СНЕРЖИВАЯ УКЛОНОВ	$\bar{I}_2 = \frac{1}{T_2 A} \left\{ (1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + S_1^2 T_2^2 \epsilon) + j \omega_2 T_2 [1 + S_1^2 T_2^2 \epsilon (\bar{G}_1 - \mu_2)] \right\} \bar{U}_2 - \frac{S_1 \omega_2 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) - [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \bar{U}_1$
	$I_2 = \frac{1}{T_2} \sqrt{\frac{1}{X_1 A} \left\{ [S_1^2 \omega_2^2 X_2 T_2 T_1 \mu_2 U_1^2 + X_1 (1 + S_1^2 T_2^2 \epsilon) U_2^2 - \frac{2}{T_2} S_1 \omega_2 X_{021} X_{022} (\sin \alpha + S_1 T_1 \bar{G}_1 \cos \alpha) U_1 U_2] \right\}}$
	$\Delta P_2 = \frac{1}{T_2 X_1 A} \left\{ S_1^2 \omega_2^2 X_2 T_2 T_1 \mu_2 U_1^2 + X_1 (1 + S_1^2 T_2^2 \epsilon) U_2^2 - \frac{2}{T_2} S_1 \omega_2 X_{021} X_{022} (\sin \alpha + S_1 T_1 \bar{G}_1 \cos \alpha) U_1 U_2 \right\}$
	$P_2 = -\frac{1}{T_2 A} (1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + S_1^2 T_2^2 \epsilon) U_2^2 + \frac{S_1 \omega_2 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) \cos \alpha + [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \sin \alpha U_1 U_2$
	$Q_2 = -\frac{\omega_2 T_2}{T_2 A} [1 + S_1^2 T_2^2 \epsilon (\bar{G}_1 - \mu_2)] U_2^2 + \frac{S_1 \omega_2 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) \sin \alpha - [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \cos \alpha U_1 U_2$
МОМЕНТ В ПУТИ	$M_{12} = \frac{S_1 T_2 T_1 \mu_2}{X_1 T_2 A} (S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 U_1^2 - X_1 U_2^2) + \frac{S_1 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 - S_1 T_1 \bar{G}_1) \cos \alpha - [1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] \sin \alpha U_1 U_2$
	$M_3 = M_{11} + M_{12} = \frac{S_1 T_2 \mu_1}{X_1 A} (1 + 2 S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + \omega_2^2 T_2^2) U_1^2 - \frac{S_1 T_2 T_1 \mu_2}{T_2 A} U_2^2 - 2 \frac{S_1^2 X_{021} X_{022} T_1}{X_1 T_2 T_1 A} [\bar{G}_1 \cos \alpha + \omega_2 T_2 (\bar{G}_1 - \mu_2) \sin \alpha] U_1 U_2$
	$P = P_1 + P_2 = \frac{S_1 T_2 \mu_1}{X_1 A} (1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + \omega_2^2 T_2^2) U_1^2 - \frac{1}{T_2 A} (1 + S_1 \omega_2 T_2 T_1 \mu_2 + S_1^2 T_2^2 \epsilon) U_2^2 - \frac{S_1 X_{021} X_{022}}{X_1 T_2 T_1 A} (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1) (1 - \omega_2) \cos \alpha - [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)] (1 + \omega_2) \sin \alpha U_1 U_2$
	$P_0 = P_1 + P_2 + \Delta P_0 + \Delta P_2 \quad A = (\omega_2 T_2 + S_1 T_1 \bar{G}_1)^2 - [1 - S_1 \omega_2 T_2 T_1 (\bar{G}_1 - \mu_2)]^2 \quad \omega_2 = h - S_1 (1 + h) \quad h = \frac{P_2}{P_1} \quad \alpha = \bar{\delta}_0 + \delta_0$

$$U_1 = U_2 = 1 \quad \alpha = 90^\circ \quad \omega_1 = 1 \quad \omega_2 = h + S_1(1+h)$$

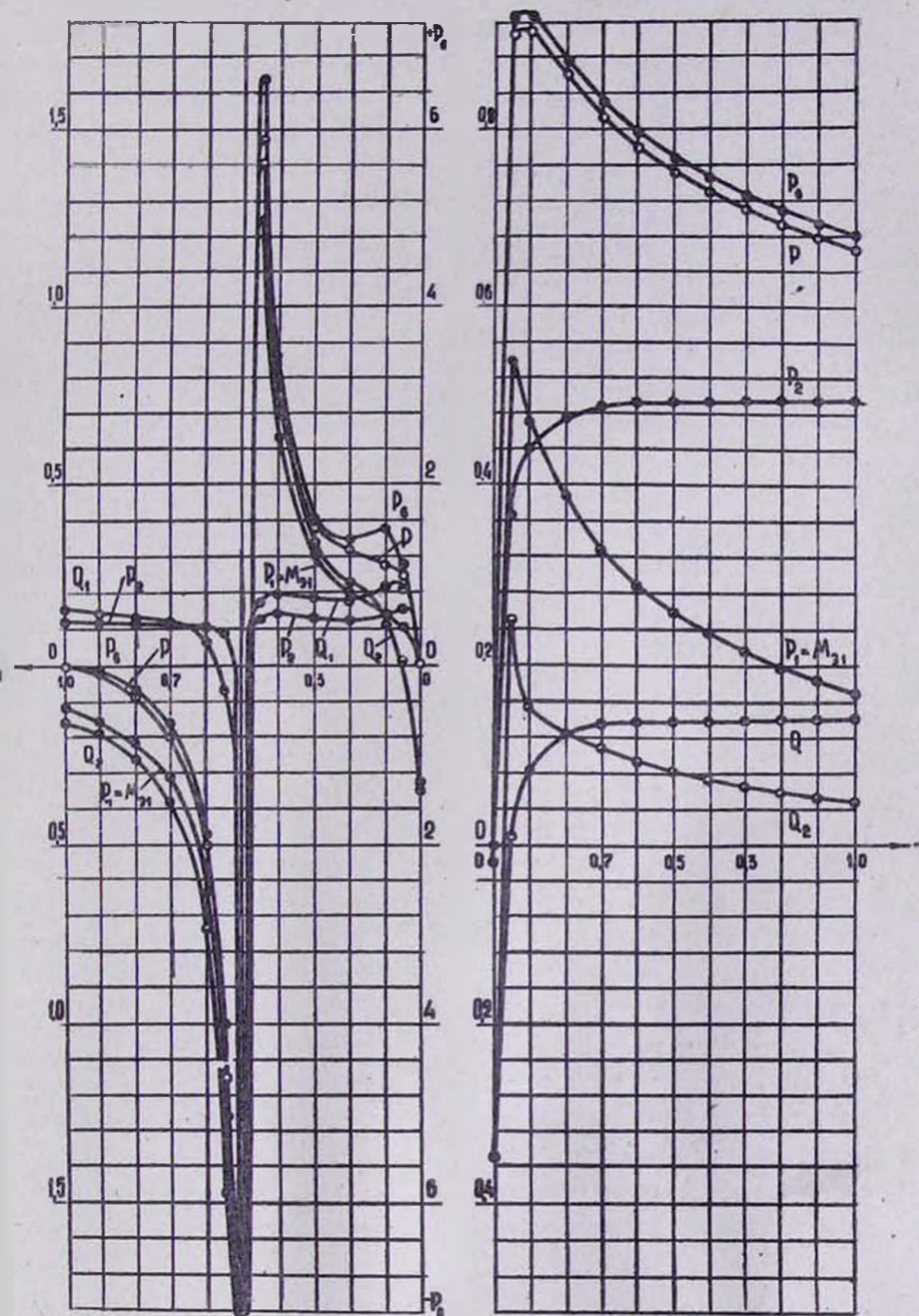


Рис. 5. Расчетные характеристики БМДП.

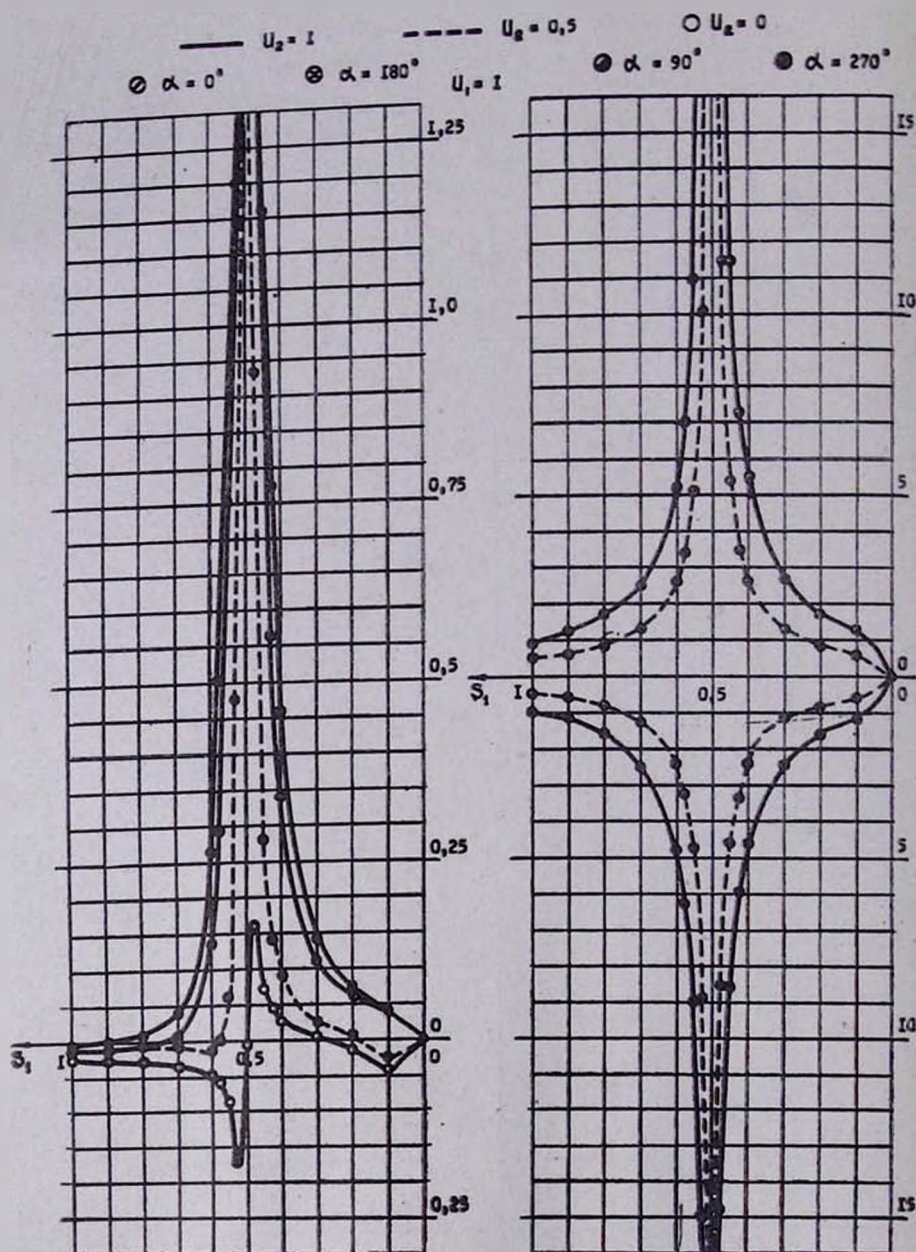


Рис. 6. Механические характеристики БМДП.

ми — прямым. На рис. 6 приведены механические характеристики БМДП при изменении скорости вращения ротора от нуля до синхронной величины. Они построены для неизменной величины напряжения статорной об-

мотки ($U_1=1$) и различных значений напряжения обмотки управления ($U_2=0; 0.5; 1$) и угла между ними ($\alpha=0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$). Из графиков видно, что при $U_2=0$ механическая характеристика БМДП по форме не отличается от механической характеристики асинхронной машины с короткозамкнутым ротором. При $U_2 \neq 0$ величина момента возрастает с величиной напряжения, а величина угла α влияет как на величину, так и на знак электромагнитного момента БМДП. Из приведенных графиков видно, что с помощью простейшего закона изменения напряжения обмотки управления можно лишь воздействовать на величину и знак механической характеристики БМДП. Однако форма в целом остается неизменной и аналогичной форме механической характеристики асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

Следует отметить, что с помощью других, более сложных законов изменения напряжения обмотки управления форма механической характеристики БМДП может быть существенно изменена. Этот вопрос является объектом отдельного исследования и выходит за рамки настоящей работы.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. В установившемся режиме работы БМДП может сохранить неизменным заданный режим нагрузки статорной обмотки при изменении скорости вращения ротора, если частота, амплитуда и вектор напряжения, а также активная и реактивная мощности обмотки управления изменяются соответствующим образом.

2. Токи, а следовательно, потери активной мощности в статорной обмотке не зависят, а в обмотке управления практически не зависят от изменения скорости вращения ротора. Они определяются только режимом нагрузки статорной обмотки и конструктивными параметрами машины. Следовательно, потери БМДП, работающей с переменной скоростью вращения, будут равны потерям аналогичной в конструктивном отношении бесконтактной машины, работающей с постоянной скоростью вращения.

3. С синхронной скоростью (практически в некотором интервале скоростей, близких к синхронной) БМДП работать не может, так как в роторной обмотке не наводится э. д. с. При работе со скоростями выше синхронной резко возрастают параметры режима обмотки управления. Поэтому в качестве рабочего интервала изменения скорости вращения ротора необходимо использовать интервал от нуля до синхронной величины ($-1 < s_1 < 0$).

4. С помощью простейших законов изменения напряжения обмотки управления можно лишь воздействовать на величину и знак расчетных характеристик БМДП. При этом форма в целом остается неизменной и аналогичной форме характеристик асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

ԳՈՓՈՆԱԿԱՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՆԿՈՆՏԱԿՏ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ՈՐՈՇ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ
1. ԿՐԿՆԱԿԻ ՍՆՈՒՑՄԱՆ ԱՆԿՈՆՏԱԿՏ ՄԵՔԵՆԱ

Ա մ փ ո փ ու մ

Դիտարկված է պտտման փոփոխական արագության մեքենայի աշխատող կրկնա-
կի սնուցման փոփոխական հոսանքի անկոնտակտ մեքենա:

Արտածված են մաթեմատիկական արտահայտություններ, որոնք թույլ
են տալիս որոշել ռեժիմի պարամետրերը՝ կախված ռոտորի պտտման արա-
գության փոփոխությունից և հիմնական մեքենայի ստատորի փաթույթի ռե-
ժիմի պարամետրերից: Կառուցված են այդ փոփոխությունները ցուցադրող
գրաֆիկներ:

Ցույց է տրված, որ ռոտորային փաթույթի և ղեկավարման փաթույթի
ռեժիմի պարամետրերը կախված չեն ռոտորի պտտման արագության փոփո-
խություններից, այլ որոշվում են միայն ստատորային փաթույթի բեռնվա-
ծության ռեժիմից և մեքենայի կոնստրուկտիվային պարամետրերից:

Ղեկավարման լարվածության փոփոխությունների պարզագույն օրենքնե-
րի միջոցով կարելի է փոխել հաշվարկային բնութագրերի միայն մեծությունն
ու նշանը, իսկ բնութագրերի ձևը մնում է անփոփոխ:

P. H. KYALIAN

SOME PROPERTIES OF THE CONTACTLESS ALTERNATING-CURRENT MACHINE (MOTOR) CONTACTLESS MACHINE OF DOUBLE SUPPLY

S u m m a r y

A contactless variable rotative speed alternating-current machine of double supply is considered. This machine is presented as a cascade consisted of two asynchronous machines with the phase-wound rotor. The equations determining parameters of the regime are obtained. The curves illustrating their variations depending on rotative speed variations of the rotor and parameters of the regime of primary winding of main machine are presented. It is shown that parameters of the secondary winding and control winding do not depend on variations of rotative speed of the rotor. They are determined by load conditions of the primary winding and constructive parameters of the machine.

It is possible to change the magnitudes and signs of calculated characteristics by the simplest laws of variations of control tension without changing of the forms of the characteristics.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. М. М. Ботвинник, Ю. Г. Шварцман, Управляемая машина переменного тока, М. «Наука», 1969.
2. П. А. Кялян. Известия ВУЗов, Энергетика, № 11, 7, 1965.