Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова, т. XX, вып. 1, 1976 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ–ДВИГАТЕЛЬ В ЧАСТОТНЫХ ПРИВОДАХ ГОРНЫХ МАШИН

Ю.П.ПАВЛОВ, А.Е.КОЗЯРУК, Н.С.КУЛАГИН, В.С.СОЛОВЬЕВ

Для анализа спектрального состава выходного напряжения тиристорного непосредственного преобразователя частоты с принудительной коммутацией (ТНПЧ–ПК), предложенного ранее [8], воспользуемся следующим выражением [9]:

$$S(\omega)=\sum_{i=0,1,2}^{\infty}\sum_{k=0,1,2}^{\infty}\frac{1}{2}C_i G_k e^{j\varphi_k} e^{j\varphi_i}\left[\delta(\omega-i\omega_м+k\Omega)+\delta(\omega-i\omega_м-k\Omega)\right]\left(1-e^{j\pi(k+i)}\right), \quad (1)$$

где $S(\omega)$ – спектр выходного напряжения преобразователя частоты; k, i – порядковые номера гармоник; C_i, G_k; φ_i, φ_k и $\omega_м$, Ω – амплитуды, фазы и частоты гармоник модулируемой и модулирующей функций.

Полагаем, что в выходном напряжении ТНПЧ–ПК угол коммутации $\gamma = 0$ и отсутствуют коммутационные разрядные пики.

Комбинационные частоты спектра выходной функции

$$\omega_{комб} = i\omega_м \pm k\Omega . \quad (2)$$

Обозначим отношение питающей и выходной частот преобразователя $\Omega/\omega_м = \varepsilon$, тогда

$$\omega_{комб} = \omega_м\left(i \pm k\varepsilon\right) . \quad (3)$$

Из выражения (I) видно, что при $i = 2n - I$ спектр выходного напряжения $S(\omega) \neq 0$ только при $k = 2z$, где $n = I, 2, 3, \ldots$; $z = I,2,3\ldots$; $S(\omega) \neq 0$ при $i = 0$ и $i = 2n$ только при нечетных значениях k.

Рассмотрим значения комбинационных частот при различных ε.

Если ε – целое четное число ($\varepsilon = 2l$, где $l = I,2,3,\ldots$), то $\omega_{комб} = \omega_м(i \pm 2lk)$. Значение $\omega_{комб}$ для $i = 2n - I$ и $k = 2z$ – нечетное число; для $i = 0$; $i = 2n$ и нечетных k – четное число. Следовательно, при $\varepsilon = 2l$ в спектре выходного напряжения преобразователя имеются как четные, так и нечетные комбинации циклической частоты $\omega_м$, а также постоянная составляющая при $i = \varepsilon k$ (табл.I, п.IУ). Наличие углов γ и коммутационных разрядных пиков в реальной кривой выходного на-

Таблица 1

Спектральный состав выходного напряжения ТНПЧ-ПК

Режим работы	Амплитуды гармонических составляющих											
	0-й	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й
I. При f = 30 Гц; ε = 5												
α = 0; γ = 50°; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	–	0,8335	–	0,4232	–	0,1798	–	0,08708	–	0,1469	–	0,1211
α = 30°; γ = 35°; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°:	–	0,8093	–	0,3663	–	0,24758	–	0,1786	–	0,1794	–	0,1924
α = 60°; γ = 25°; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	–	0,506	–	0,2756	–	0,2618	–	0,2445	–	0,1045	–	0,0709
α = 30°; γ = 35°; $\varphi_{\text{П}}$ = 24°	–	0,8209	–	0,4708	–	0,0982	–	0,1926	–	0,1630	–	0,0798
α = 80°; γ = 0; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	–	0,4081	–	0,2131	–	0,2532	–	0,2953	–	0,1132	–	0,0653
II. При f = 50 Гц; ε = 3												
α = 0; γ = 0; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	–	1,0493	–	0,2705	–	0,2101	–	0,1432	–	0,0701	–	0,1016
α = 30°; γ = 0; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	–	0,9930	–	0,2843	–	0,2356	–	0,1574	–	0,0736	–	0,1261
α = 60°; γ = 0; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	–	0,6643	–	0,2421	–	0,2501	–	0,2088	–	0,0397	–	0,1711
α = 30°; γ = 0; $\varphi_{\text{П}}$ = 360°	–	0,9138	–	0,0891	–	0,2564	–	0,2023	–	0,0212	–	0,1296
III. При f = 60 Гц; ε = 2,5												
α = 0; γ = 50°; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	0,0166	0,1190	0,4773	0,0661	0,0468	0,1851	0,3640	0,0352	0,0694	0,0178	0,2601	0,0113
α = 30°; γ = 35°; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	0,0226	0,1671	0,8672	0,0149	0,0668	0,2080	0,4293	0,0575	0,0263	0,0463	0,2512	0,0415
IV. При f = 75 Гц; ε = 2												
α = 0; γ = 30°; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	0,0465	1,0081	0,2275	0,3612	0,0390	0,2131	0,0209	0,1153	0,0344	0,0544	0,0465	0,0343
α = 0; γ = 0; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	0,0273	1,063	0,1659	0,3603	0,0441	0,1866	0,0211	0,1125	0,0213	0,044	0,0176	0,0352
α = 0; γ = 15°; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	0,0328	1,055	0,1781	0,4012	0,0390	0,1913	0,0517	0,1126	0,0277	0,0533	0,0171	0,0369
α = 30°; γ = 0; $\varphi_{\text{П}}$ = 36°	0,0339	0,9791	0,2456	0,374	0,0389	0,2513	0,0342	0,1293	0,0261	0,0809	0,0329	0,0366

пряжения не искажает частотный спектр выходного напряжения преобразователя по сравнению со спектральным составом, который определяется выражением (I).

Если ε – целое нечетное число, то значение $\omega_{комб}$ для $i = 2n - I$ и четных k – нечетное число; для $i = 0$; $i = 2n$ и нечетных k – тоже нечетное число. Следовательно, в спектре выходного напряжения содержатся только нечетные комбинации циклической частоты $\omega_м$ (табл.I, п.I и II). Наличие углов γ и коммутационных разрядных пиков в реальной кривой выходного напряжения не изменяет частотный спектр по сравнению со спектральным составом, который определяется выражением (I).

Если $\varepsilon = a/b$ – дробное число, где a и b – целые несократимые числа, то $\omega_{комб} = \frac{\omega_м}{b}(ib \pm ka)$. Это соотношение показывает, что выходное напряжение остается периодическим, однако его циклическая частота меньше частоты $\omega_м$ модулируемого напряжения в b раз. Так, для $f_2 =$ = 60 Гц ($\varepsilon = 5/2$) циклическая частота $f_ц$ = 30 Гц, а несущая частота f_2 = 60 Гц является второй гармоникой (табл.I, п.III). В спектре выходного напряжения содержатся как четные, так и нечетные комбинации циклической частоты. Условие содержания постоянной составляющей определяется выражением $ib = ka$.

При иррациональном ε функция $F(t)$ непериодична, однако с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять ε приближенно рациональным, а функцию $F(t)$ – периодической. Период повторения и условие наличия постоянной составляющей определяется так же, как для $\varepsilon = a/b$.

Итак, выражение (I) определяет спектральный состав выходного напряжения при γ = 0 и отсутствии коммутационных пиков.

Сравнительные спектры выходного напряжения в табл.2 вычислены по формуле (I) и определены графоаналитическим методом при наличии разрядных коммутационных пиков. Из табл.2 видно, что для предварительных расчетов характеристик АД при γ = 0 можно использовать амплитудный спектр, вычисленный по формуле (I).

Для точных расчетов необходимо знать гармонический состав выходного напряжения ТНПЧ-ПК с учетом углов γ и разрядных коммутационных пиков. Однако при их наличии практически невозможно аналитически исследовать спектральный состав кривой выходного напряжения преобразователя. Поэтому наряду с оценкой характера спектра по формуле (I) исследовался гармонический состав экспериментальных кривых выходного напряжения в зависимости от соотношения частот ε , углов регулирования α , углов коммутации γ и углов перерыва $\varphi_п$ с применением расчетов на ЦВМ.

Наиболее точен, прост и требует минимума машинного времени графоаналитический способ гармонического анализа с аппроксимацией исследуемой функции. Кривая выходного напряжения разбивается на дискретные участки с интервалом дискретности Δt , который выбирается таким образом, чтобы значения ординат приходились на все характерные точки кривой напряжения.

Для расчета использовался метод замены действительной кривой на участках Δt_i квадратичной параболой (метод Филона). Имеется библиотечная программа определения гармонических коэффициентов этим методом. Рассмот-

Таблица 2

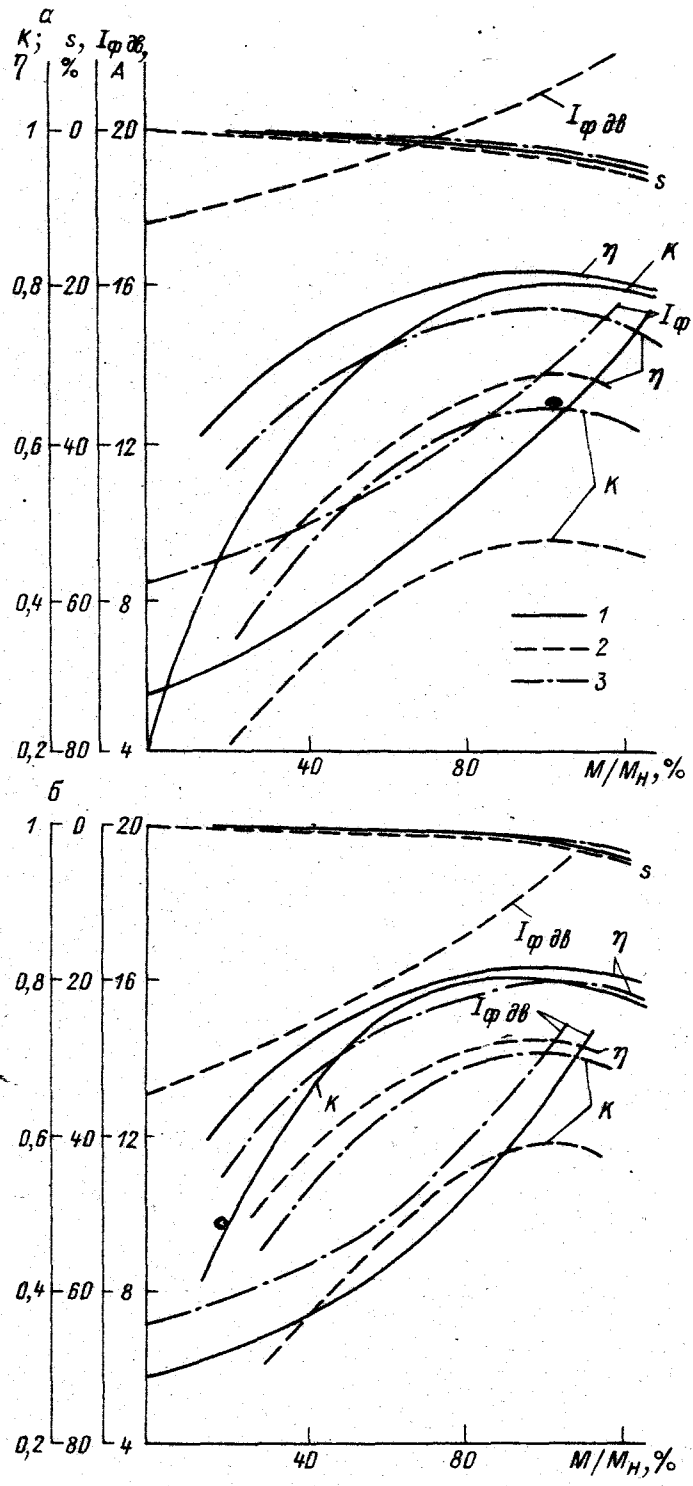
Сравнительные данные спектрального состава выходного напряжения ТНПЧ-ПК

Режим работы	Амплитуды гармонических составляющих											
	0-й	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й
I. При f = 50 Гц; ε = 3												
Эксперимент α = 0; γ = 0; $\varphi_{п}$ = 36°	-	1,0493	-	0,2703	-	0,2101	-	0,1432	-	0,0704	-	0,1016
Расчет α = 0; γ = 0; $\varphi_{п}$ = 36°	-	0,966	-	0,2651	-	0,0266	-	0,1120	-	0,0513	-	0,0984
II. При f = 75 Гц; ε = 2												
Эксперимент α = 0; γ = 0; $\varphi_{п}$ = 36°	0,0273	1,063	0,1659	0,3603	0,0441	0,1866	0,0211	0,1125	0,0213	0,044	0,0176	0,0352
Расчет α = 0; γ = 0; $\varphi_{п}$ = 36°	0,0205	0,9396	0,1636	0,2268	0,0222	0,0528	0,0120	0,1062	0,0022	0,041	0,0095	0,095

ренным способом проведен гармонический анализ кривой выходного напряжения ТНПЧ-ПК на ЦВМ для различных ε, α, γ и $\varphi_{п}$ (см. табл.I и 2).

Результаты гармонического анализа кривой выходного напряжения показывают: I) для четных и нечетных значений ε частотный спектр не отличается от спектра, определяемого выражением (I); 2) для $\varepsilon = a/b$, где a и b – целые несократимые числа, f_2 = 60 Гц; ε = 2,5, циклическая частота $f_{ц}$ = 30 Гц в 2 раза меньше модулирующей частоты f_2 = 60 Гц; в спектре выходного напряжения имеется постоянная составляющая ($bi = ak$, где k = 2; i = 5); частотный спектр не отличается от спектра, определяемого выражением (I).

Влияние высших гармонических составляющих выходного напряжения ТНПЧ-ПК на асинхронный двигатель лучше всего исследовать, пользуясь методом гармонических двигателей [I]. Причем следует рассматривать влияние каждой гармонической на гармонический двигатель отдельно, а затем определять суммарные характеристики АД. Метод суперпозиции применим только в том случае, если принято предположение о ненасыщенности асинхронной машины и симметричности приложенного к зажимам статора напряжения. Магнитное поле в АД, вызванное высшими гармониками с порядковыми номерами km + I, равными (при m = 3) 4; 7; I0; I3..., вращается в сторону вращения ротора со скольжением при нормальных режимах работы $S_{ч} \approx 1 - \frac{1}{\nu}$ [4]. Высшие гармоники с порядковыми номерами km – I, равными (при m = 3)


а
K; η
s, %
Iф дв, A
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
20
40
60
80
20
16
12
8
4
Iф дв
s
η
K
1
2
3
40
80
M/Mн, %
б
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
20
40
60
80
20
16
12
8
4
s
Iф дв
η
K
40
80
M/Mн, %

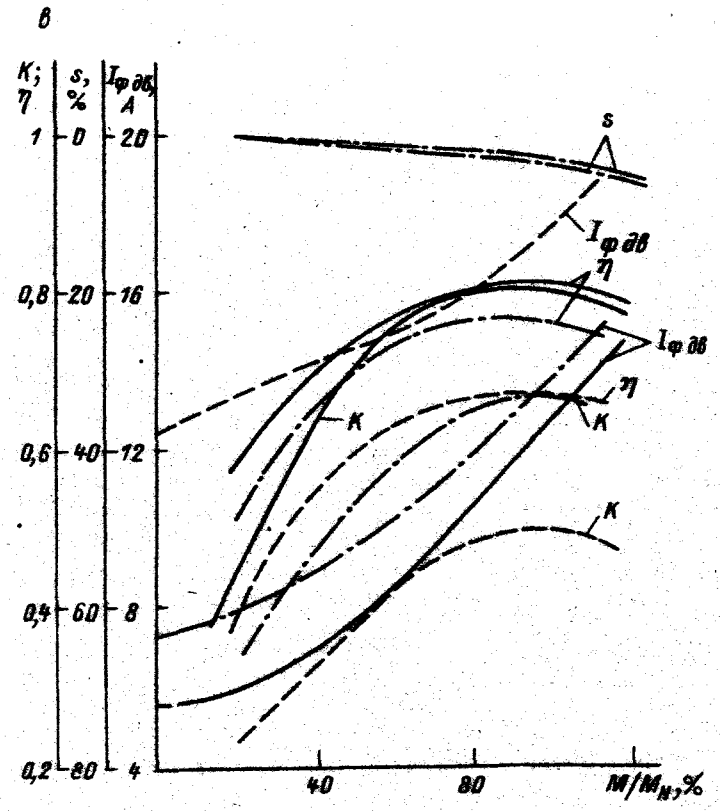


Рис.1. Расчетные рабочие характеристики АД при питании его от ТИПЧ-ПК с нулевым (2) и без нулевого (3) провода и от синхронного генератора (1)

2; 5; 8; 11..., определяют поле, вращающееся против вращения ротора (инверсные) со скольжением при нормальных режимах работы $S_\nu \simeq 1 + \frac{1}{\nu}$. Здесь k – любое целое число от 0 до n; m – число фаз.

Постоянная составляющая и гармонические, кратные трем, не создают вращающихся полей.

При соединении обмоток двигателя звездой без нулевого провода гармоники нулевой последовательности взаимно компенсируются. Основными вопросами при исследовании влияния высших гармонических является вопрос об изменении вращающего момента M, коэффициента полезного действия η и $\cos\varphi$. Соотношение моментов АД, развиваемых 1-й и ν-й гармоникой [6],

$$\frac{M_\nu}{M_1} = \frac{U_\nu^2 S_1}{U_1 S_\nu \nu} \cdot \frac{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S_1}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S_\nu}\right)^2 + \nu^2 (x_1 + x_2')^2}, \qquad (4)$$

где

$$\frac{U_\nu}{U_1} < 1; \quad \frac{S_1}{S_\nu} < 1; \quad \nu > 1 .$$

Из выражения (4) видно, что изменение вращающего момента двигателя от высших гармонических незначительно и с возрастанием порядкового номера гармоники уменьшается до нуля. Кроме того, высшие гармонические появляются с переменным направлением. Поэтому постоянный вращающий момент от высших гармоник ТНПЧ-ПК не имеет практического значения. Так, для двигателя ЭДК04-4М вторая гармоника выходного напряжения ТНПЧ-ПК с амплитудой до 24% от основной изменяет момент двигателя на 0,16%.

Кроме вращающего момента, который образуется в результате взаимодействия между потоком ν-й гармоники и током той же гармонической, появляются пульсирующие моменты от взаимодействия поля основной гармоники с токами высших гармонических. Отношение амплитуд пульсирующего момента к основному вращающему моменту пропорционально отношению тока высшей гармоники к току основной гармонической. Среднее значение пульсирующего момента равно нулю, поэтому пульсации моментов не сказываются на вращающем моменте.

На рис.I приведены сравнительные расчетные рабочие характеристики асинхронной машины типа А02-51-6 при питании ее от исследуемого ТНПЧ-ПК (с нулевым и без нулевого провода) и от напряжения синусоидальной формы при $\varepsilon = 2$ (рис.I,а); $\varepsilon = 3$ (рис.I,б); $\varepsilon = 5$ (рис.I,в); $U_{1\Phi} = 330$ В; $f_1 = 50$ Гц. Действующие значения синусоидального напряжения и I-й гармоники выходного напряжения ТНПЧ-ПК равны. Фазное напряжение I-й гармоники и частоты двигателя изменяются по закону $U_{2\Phi}/f_2 = 4{,}4$. При расчетах использовались данные гармонического анализа (см. табл.I и 2).

Анализ рабочих характеристик показывает: наличие высших гармонических в напряжении ТНПЧ-ПК обуславливает возрастание фазного напряжения и тока, а значит уменьшение η и коэффициента мощности двигателя K по сравнению с энергетическими показателями АД при питании от напряжения синусоидальной формы. Преобразователь частоты без нулевого провода при номинальном режиме работы АД понижает K в зависимости от ε на 11-24%, а η на 2,5-6%; ТНПЧ-ПК с нулевым проводом при номинальном режиме работы АД понижает K в зависимости от ε на 38-70%, а η на 15-20%. Наилучшие энергетические показатели имеет двигатель в системе ТНПЧ-ПК-АД при $\varepsilon = 3$, так как на частоте $f_2 = 50$ Гц выходное напряжение преобразователя имеет наилучший относительный спектральный состав.

При расчете рабочих характеристик АД использовались опубликованные материалы [2, 3, 4, 5].

Рабочие характеристики для токов от высших гармонических, кратных трем, представляющих нулевую последовательность, строились с учетом значений сопротивления двигателя для нулевой последовательности.

Активное сопротивление можно считать равным активному сопротивлению для I-й гармонической [6] или его значение следует уточнять по формулам [7].

В индуктивное сопротивление нулевой последовательности входят только составляющие пазового рассеяния и составляющие дифференциального рассеяния, равные сумме зубцового и поясного рассеяния. Индуктивное сопротивление лобовых частей отсутствует, так как при протекании по лобовым час-

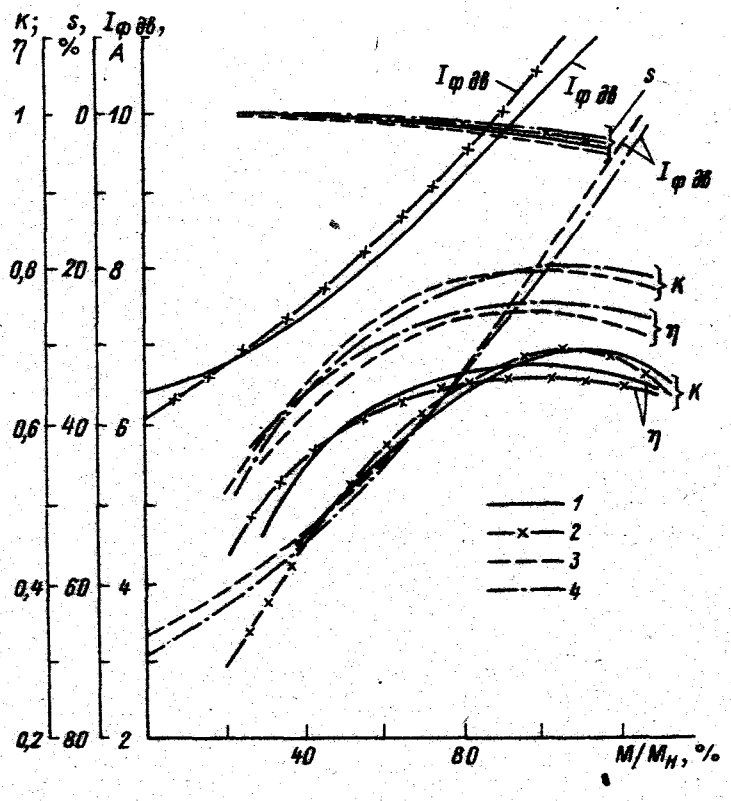


Рис.2. Сравнительные рабочие характеристики АД при питании его от ТНПЧ-ПК ($U_{1ф}$ = 130 В; f_2 = 50 Гц)
1 и 2 – с нулевым проводом ($U_{2ф}$ = 142 В); 3 и 4 – без нулевого провода ($U_{2л}$ = 139 В); 1 и 3 – теоретические кривые; 2 и 4 – экспериментальные

тям всех фазовых обмоток токов, совпадающих по фазе, поле рассеяния лобовых частей оказывается уравновешенным. М.П.Костенко [6] приведена формула для определения индуктивного сопротивления нулевой последовательности через конструктивные и обмоточные параметры АД.

Расчетные рабочие характеристики АД при питании его от ТПЧК-ПК хорошо совпадают с практически полученными кривыми (рис.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Асинхронный двигатель в анормальных режимах. Л., изд.ВЭТА, 1938. Авт.: А.Я.Бергер, Л.Н.Грузов, А.С.Коган, Е.Д.Несговорова.

2. Булгаков А.А. Частотное управление электродвигателями. М., „Наука", 1968.

3. Загорский А.Е., Золотов М.Б. Автономный электрический привод повышенной частоты. М., „Энергия", 1973.

4. Ковач К.Л., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.

5. Козярук А.Е. Анализ и экспериментальные исследования влияния высших гармонических на работу асинхронного двигателя при частотном управлении. - В кн.: Статические преобразователи в электроприводах переменного тока. Л., Изд-во АН СССР, 1968.

6. Костенко М.П. Электрические машины (Специальная часть). М.-Л., Госэнергоиздат, 1949.

7. Левин М.С., Куц П.В. О сопротивлении нулевой последовательности асинхронных двигателей. - „Электричество", 1953, № 2.

8. Павлов Ю.П. Тиристорный непосредственный преобразователь частоты с принудительной коммутацией. Изд. ЛДНТП, 1972.

9. Павлов Ю.П., Слепцова З.Б. Исследование спектрального состава напряжения НПЧ для приводов шагового поворота шаровых мельниц. - РЖ. Сводный том „Электротехника и энергетика", 1975, № 9, реф. 9К 134-75.