

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Вороновский Г.К., д.т.н., проф., Орловский И.В.  
 ОАО "Харьковская ТЭЦ-5"  
 Украина, 62371, Харьковская обл., Дергачевский р-н, пос. Подворки  
 тел. (0572) 20-50-50

Осташевский Н.А., к.т.н., проф.  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"

*Розглянуто задачу комп'ютерного моделювання режимів роботи асинхронних двигунів з метою визначення енергетичних показників по споживаній активній потужності*

*Рассмотрена задача компьютерного моделирования режимов работы асинхронных двигателей с целью определения энергетических показателей по потребляемой активной мощности*

Известно, что потребление электроэнергии на собственные нужды составляет до 8...10 % от всей вырабатываемой на электростанции электрической энергии. В связи с этим обеспечение эффективности работы потребителей, т.е. снижение энергопотребления на собственные нужды является весьма актуальной задачей. Основными потребителями электроэнергии на собственные нужды, являются асинхронные двигатели, используемые для привода дымососов, вентиляторов, насосов холодной и горячей воды. По технологическим условиям эти двигатели работают в режимах переменных нагрузок в зависимости от времени суток, времени года, мощности электрических и тепловых сетей.

Автоматизация учета расхода электроэнергии ТЭЦ позволяет осуществлять мониторинг потребляемой на собственные нужды электроэнергии по каждому двигателю, в частности получать суточные (и другие) диаграммы энергопотребления. Отличаясь простотой и дешевизной, измерительные устройства системы учета расхода электроэнергии позволяют охарактеризовать только потребление активной мощности в зависимости от времени. В то же время эффективность работы асинхронных двигателей определяется энергетическими показателями: коэффициентом полезного действия (КПД) –  $\eta$ , коэффициентом мощности –  $\cos\varphi$  и их произведением –  $K_3$ . При этом энергетические показатели зависят от величины нагрузки на валу двигателя и параметров питающей сети – напряжения и частоты и являются нелинейными функциями этих параметров. Обеспечение высокой эффективности работы двигателей означает, с одной стороны, такое управление двигателями, при котором достигаются максимально возможные значения энергетических показателей, с другой стороны, в случае необходимости, корректировку величины номинальных мощностей установленных двигателей. В обоих

случаях исходной информацией для решения поставленной задачи снижения энергопотребления на собственные нужды являются диаграммы энергопотребления, определяемые по данным измерений разработанных устройств для каждого двигателя.

Характерной особенностью асинхронных двигателей является существенное снижение КПД и  $\cos\varphi$  при уменьшении нагрузки на валу. Но, если величина нагрузки определяется технологическими условиями, то изменение параметров питающей сети, также оказывающих существенное влияние на энергетические показатели двигателей, носит случайный характер.

Для решения поставленной задачи учета потребления энергии необходимо разработать методику расчета энергетических показателей двигателей для наиболее общего случая изменения величин нагрузки на валу, напряжения и частоты (общий случай частотно-управления), на базе которой разработать математические модели, учитывающие собственно энергетические показатели: КПД ( $\eta$ ),  $\cos\varphi$ , и  $K_3$ .

Расчет энергетических показателей производится на базе методики расчета рабочих характеристик частотно-управляемых асинхронных двигателей. При этом используется преобразованная Г-образная схема замещения [1].

Как установлено, изменение энергетических показателей двигателей в процессе их работы происходит под действием трех факторов: напряжение сети  $U_1$ , частота напряжения  $f_1$ , величина нагрузки двигателя  $P_2$ . Одновременный учет влияния всех перечисленных факторов возможен при использовании методов теории планируемого эксперимента, позволяющих создать математические модели энергетических показателей двигателей [2, 3].

В качестве объекта исследования принят асин-

хронный двигатель АНН-17-45-10 с номинальными данными:  $P_{2ном}=1600$  кВт,  $U_{1ном}=3460$  В,  $I_{1ном} = 184,6$  А,  $n_{ном} = 596$  об/мин. Диапазоны изменения независимых факторов определены в соответствии с требованиями ГОСТ к питающим сетям и технологическими условиями работы двигателя:

$$\begin{aligned} U_{1min} &= 0,85 \cdot U_{1ном}; U_{1max} = 1,1 \cdot U_{1ном}; \\ f_{1min} &= 0,975 \cdot f_{1ном}; f_{1max} = 1,025 \cdot f_{1ном}; \\ P_{2min} &= 0,2 \cdot P_{2ном}; P_{2max} = 1,0 \cdot P_{2ном}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ввиду очевидной нелинейности задачи использован ортогональный центрально-композиционный

план второго порядка, представленный в табл. 1. Напряжение сети  $U_1$ , частота сети  $f_1$  и величина нагрузки  $P_2$  в кодированной форме обозначены  $X_1, X_2, X_3$ , соответственно.

Для каждой строки плана, т.е. сочетания  $U_1$  и  $f_1$ , по разработанной методике определялись зависимости  $\eta = f(P_2)$ ,  $\cos\varphi = f(P_2)$ ,  $K_3 = f(P_2)$ , а затем для значений  $P_2$  из этой же строки определялись  $\eta$ ,  $\cos\varphi$ ,  $K_3$ , обозначаемые  $Y_{u1}, Y_{u2}, Y_{u3}$ , соответственно.

Таблица 1

$n$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{23}$	$\tilde{X}_1^2$	$\tilde{X}_2^2$	$\tilde{X}_3^2$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0.2697	0.2697	0.2697
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.2697	0.2697	0.2697
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0.2697	0.2697	0.2697
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	0.2697	0.2697	0.2697
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.2697	0.2697	0.2697
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	0.2697	0.2697	0.2697
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	0.2697	0.2697	0.2697
8	1	1	1	1	1	1	1	0.2697	0.2697	0.2697
9	1	-1.2154	0	0	0	0	0	0.7469	-0.7303	-0.7303
10	1	1.2154	0	0	0	0	0	0.7469	-0.7303	-0.7303
11	1	0	-1.2154	0	0	0	0	-0.7303	0.7469	-0.7303
12	1	0	1.2154	0	0	0	0	-0.7303	0.7469	-0.7303
13	1	0	0	-1.2154	0	0	0	-0.7303	-0.7303	0.7469
14	1	0	0	1.2154	0	0	0	-0.7303	-0.7303	0.7469
15	1	0	0	0	0	0	0	-0.7303	-0.7303	-0.7303

Обработка результатов расчетного эксперимента производилась в соответствии с [2, 3]. Математические модели энергетических показателей в форме аппроксимирующих полиномов обозначены  $\hat{Y}_{u1}, \hat{Y}_{u2}, \hat{Y}_{u3}$  для  $\eta, \cos\varphi, K_3$ , соответственно, и имеют вид:

$$\begin{cases} \hat{Y}_{u1} = 0,95072 - 0,00231 \cdot X_1 - 0,00026 \cdot X_2 + 0,02479 \cdot X_3 - \\ - 0,00043 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,00781 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,00031 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0,00335 \cdot (X_1)^2 + 0,00403 \cdot (X_2)^2 - 0,02609 \cdot (X_3)^2; \\ \hat{Y}_{u2} = 0,82484 - 0,0427 \cdot X_1 - 0,00475 \cdot X_2 + 0,16898 \cdot X_3 - \\ + 0,00023 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,04638 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0048 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0,00316 \cdot (X_1)^2 + 0,00892 \cdot (X_2)^2 - 0,13255 \cdot (X_3)^2; \\ \hat{Y}_{u3} = 0,78071 - 0,04015 \cdot X_1 + 0,00426 \cdot X_2 + 0,16853 \cdot X_3 - \\ - 0,00005 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,04734 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,00434 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0,00890 \cdot (X_1)^2 + 0,01493 \cdot (X_2)^2 - 0,14482 \cdot (X_3)^2. \end{cases} \quad (2)$$

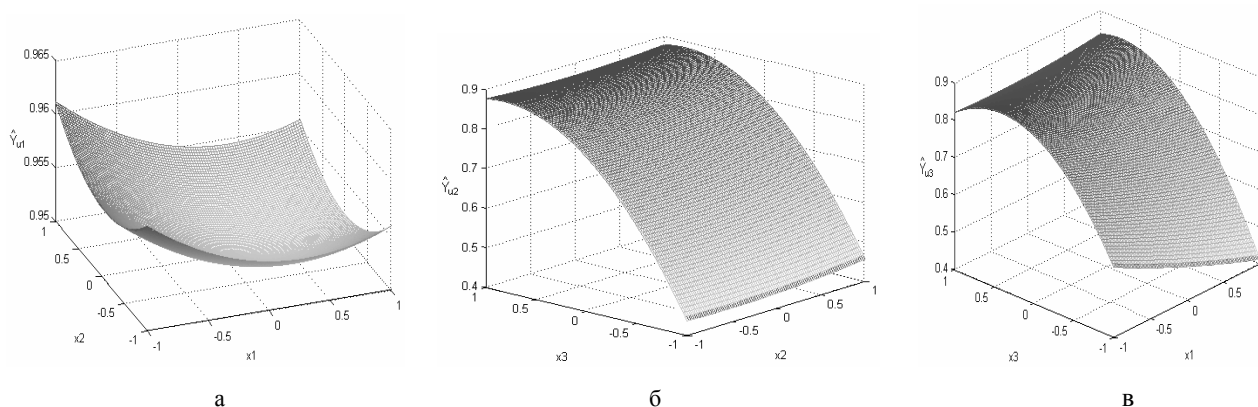
Коэффициенты аппроксимирующих полиномов проверялись на значимость с помощью  $t$ -критерия Стьюдента. При этом часть коэффициентов оказалась незначимыми, однако, для унификации записи полиномов при их расчете эти коэффициенты учитывались.

Расчетные значения  $Y_{u1}, Y_{u2}, Y_{u3}$  и значения  $\hat{Y}_{u1}, \hat{Y}_{u2}, \hat{Y}_{u3}$ , полученные с помощью математических моделей для всех строк плана, представлены в табл. 2.

Проверка адекватности производилась с помощью  $F$ -критерия Фишера. При этом для всех полиномов значения  $F$ -критерия оказались меньше  $F_{крит}$ .

Степень влияния факторов  $X_1, X_2, X_3$ , на величины энергетических показателей  $\hat{Y}_{u1}, \hat{Y}_{u2}, \hat{Y}_{u3}$ , можно иллюстрировать с помощью частичных поверхностей отклика, построенных по полученным математическим моделям при фиксированном значении одного из факторов. В качестве примера на рис. 1, а-в приведены частичные поверхности отклика для  $\hat{Y}_{u1}$  при  $X_3 = 0 = \text{const}$ ,  $\hat{Y}_{u2}$  при  $X_1 = +1 = \text{const}$ ,  $\hat{Y}_{u3}$  при  $X_2 = +1 = \text{const}$ .

$n$	$Y_{U1}$	$Y_{U2}$	$Y_{U3}$	$\hat{Y}_{U1}$	$\hat{Y}_{U2}$	$\hat{Y}_{U3}$
1	0.9225	0.6300	0.5811	0.91748	0.61518	0.57004
2	0.9025	0.4480	0.4043	0.89811	0.43634	0.39512
3	0.9225	0.6525	0.6019	0.91720	0.63398	0.58737
4	0.8995	0.4650	0.4182	0.89608	0.45609	0.41225
5	0.9485	0.8635	0.8190	0.95083	0.87014	0.82110
6	0.9585	0.8606	0.8249	0.96270	0.87685	0.83558
7	0.9485	0.8600	0.8157	0.95180	0.86939	0.82103
8	0.9580	0.8645	0.8281	0.96192	0.87705	0.83531
9	0.9550	0.8680	0.8289	0.95849	0.88154	0.84268
10	0.9535	0.7450	0.7485	0.95287	0.77751	0.74506
11	0.9550	0.8300	0.7926	0.95700	0.83225	0.79758
12	0.9555	0.8400	0.8026	0.95636	0.84380	0.80796
13	0.8675	0.3800	0.3296	0.88204	0.42365	0.36194
14	0.9540	0.8720	0.7936	0.94232	0.83441	0.77160
15	0.9550	0.8340	0.7964	0.95072	0.82484	0.78071

Рис. 1. Частичная поверхность отклика  $\hat{Y}_{u1}$   $\hat{Y}_{u2}$   $\hat{Y}_{u3}$  при:

- а —  $x_3 = 0 = \text{const}$  ;
- б —  $x_1 = +1 = \text{const}$  ;
- в —  $x_2 = +1 = \text{const}$

Как следует из приведенных рисунков, наибольшее влияние на величины энергетических показателей оказывает изменение фактора  $X_3$  (величина нагрузки), особенно это характерно для  $\hat{Y}_{u2}(\cos\varphi)$ . Вторым по степени влияния является фактор  $X_1$  (величина напряжения). Как и в предыдущем случае, наибольшее влияние отмечено для  $\hat{Y}_{u2}(\cos\varphi)$ . Изменение частоты питающего напряжения в заданном диапазоне (фактор  $X_2$ ) не оказывает существенного влияния на величины всех энергетических показателей.

Математические модели энергетических показателей двигателя используются при обработке результатов мониторинга энергопотребления двигателя в процессе эксплуатации. При этом изменение нагрузки определяется диаграммой энергопотребления, а изме-

нение напряжения и частоты питающей сети носят случайный характер. Текущие значения напряжения и частоты в привязке к диаграмме энергопотребления могут быть получены с помощью датчиков псевдослучайных чисел. Учитывая границы диапазона изменения, текущие случайные значения  $U_1$  и  $f_1$  можно представить в виде:

$$\begin{cases} U_1 = U_{1\min} + R_1 \cdot \frac{U_{1\max} - U_{1\min}}{10} \\ f_1 = f_{1\min} + R_2 \cdot \frac{f_{1\max} - f_{1\min}}{10} \end{cases}, \quad (3)$$

где — величины, определяемые соотношениями (1);  $R_1, R_2$  — псевдослучайные числа в диапазоне (0..9).

Исходной информацией являются рабочие характеристики двигателя, рассчитанные по предложенной методике для номинальных значений напря-

жения и частоты сети и диаграмма потребления активной мощности  $P_{1a}$ , полученная по данным измерений устройства системы автоматизированного учета расхода электроэнергии ТЭЦ.

На первом этапе с помощью рабочих характеристик для номинальных значений напряжения и частоты питающей сети, по величине  $P_{1a}$  определяются значения полезной мощности  $P_2$  и соответствующие им значения  $\eta$ ,  $\cos\phi$ ,  $K_3$  для каждой выбранной точки на диаграмме потребления активной мощности. Значения  $\eta$ ,  $\cos\phi$ ,  $K_3$  имеют предварительный ха-

рактер и уточняются с использованием математических моделей  $\hat{Y}_{u1}$ ,  $\hat{Y}_{u2}$ ,  $\hat{Y}_{u3}$ . При расчете аппроксимирующих полиномов используют полученные значения полезной мощности  $P_2$  (фактор  $X_3$ ) и текущие значения напряжения  $U_1$  (фактор  $X_1$ ) и частоты  $f_1$  (фактор  $X_2$ ), определяемые для каждой выбранной точки диаграммы потребления по соотношениям (3). Результаты обработки суточной диаграммы потребления активной мощности для двигателя АНН-17-45-10 приведены в табл. 3.

Таблица 3

$n$	$P_{1a}$	$P_2$	$\eta$	$\cos\phi$	$K_3$	$R_1$	$R_2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\hat{Y}_{u1}$	$\hat{Y}_{u1}$	$\hat{Y}_{u1}$
1	1200	1146	0.9552	0.8531	0.8149	1	3	0.7775	-0.3335	0.33351	0.95817	0.88739	0.84400
2	1090	1039	0.9531	0.8449	0.8053	8	2	0.7798	0.5557	0.12343	0.95592	0.81704	0.78052
3	1020	972	0.9522	0.8351	0.7952	7	6	0.5573	0.3330	0.01875	0.95129	0.80816	0.76773
4	1000	951	0.9512	0.8342	0.7935	3	6	-0.3325	0.3330	-0.01406	0.95195	0.83980	0.79596
5	980	935	0.9508	0.8310	0.7901	0	3	-1	0.3335	-0.03906	0.95607	0.86521	0.82497
6	1000	951	0.9509	0.8339	0.7929	0	0	-1	-1	-0.01406	0.96000	0.87337	0.83858
7	1020	972	0.9522	0.8319	0.7921	8	7	0.7798	0.5551	0.01875	0.95244	0.80262	0.76551
8	1140	1083	0.9498	0.8491	0.8065	1	7	-0.7775	0.5551	0.19218	0.95849	0.88543	0.84379
9	1340	1280	0.9553	0.8642	0.8256	5	3	0.1123	0.3335	0.5	0.95731	0.87424	0.82799
10	1480	1420	0.9589	0.8669	0.8313	2	2	-0.5550	0.5557	0.71875	0.95539	0.88617	0.83712
11	1530	1465	0.9579	0.8721	0.8354	5	3	0.1123	0.3335	0.78906	0.95498	0.87567	0.82470
12	1560	1495	0.9579	0.8721	0.8354	3	0	-0.3326	-1	0.83593	0.95607	0.88348	0.83584
13	1510	1445	0.9579	0.8721	0.8354	5	6	0.1124	0.3330	0.75781	0.95539	0.87730	0.82686
14	1520	1455	0.9579	0.8721	0.8354	8	1	0.7798	-0.7778	0.77343	0.96195	0.87726	0.83544
15	1550	1485	0.9579	0.8729	0.8362	0	2	-1	-0.5557	0.82031	0.95376	0.88463	0.83581
16	1530	1465	0.9579	0.8729	0.8362	1	5	-0.7775	0.1108	0.78906	0.95315	0.88256	0.83135
17	1440	1380	0.9579	0.8661	0.8296	3	5	-0.3326	0.1108	0.65625	0.95524	0.88337	0.83328
18	1340	1280	0.9549	0.8639	0.8249	7	8	0.5573	0.7773	0.5	0.96069	0.87353	0.83297
19	1320	1260	0.9549	0.8581	0.8194	5	4	0.1124	-0.1114	0.46875	0.95689	0.87243	0.82591
20	1290	1230	0.9549	0.8581	0.8194	7	1	0.5573	-0.7778	0.42187	0.96085	0.86377	0.82471
21	1280	1220	0.9549	0.8581	0.8194	3	3	-0.3326	-0.3335	0.40625	0.95701	0.88002	0.83403
22	1390	1330	0.9581	0.8631	0.8269	5	0	0.1124	-1	0.57812	0.96078	0.88343	0.84159
23	1520	1455	0.9581	0.8701	0.8336	6	3	0.3329	-0.3335	0.77343	0.95641	0.87492	0.82560
24	1100	1340	0.9581	0.8631	0.8269	7	4	0.5573	-0.1114	0.59375	0.95866	0.87081	0.83577

Аналогичным образом могут быть получены математические модели энергетических показателей всех основных потребителей электроэнергии на собственные нужды, используемые для обработки результатов мониторинга потребления активной мощности. Расчет текущих и усредненных энергетических показателей позволит обоснованно решать вопрос о необходимости и целесообразности перевода нерегулируемых асинхронных двигателей на частотное управление, а также повысить энергетические показатели путем замены недоиспользуемых двигателей на двигатели меньшей номинальной мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 321 с.
- [2] Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
- [3] Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 185 с.

Поступила 29.09.2004