

УДК 621.797

ОБОБЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПИ СТАТОРА

М. Ю. Юхименко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: sau@kdu.edu.ua

Рассмотрены вопросы исследования показателей энергоэффективности асинхронного двигателя при многофакторных вариациях сочетаний режимных параметров, видов нагрузки, метода модуляции напряжения и параметров преобразователя. Разработана методика расчета изменения потерь в асинхронных двигателях, работающих от преобразователей напряжения, отличающаяся учетом способа широтно-импульсной модуляции напряжения, частоты и скважности импульсов. Выполнено исследование и прогнозирование изменения энергоэффективности работы асинхронного двигателя при изменении параметров импульсного и неноминального питающего напряжения и нагрузки. Предложены методы повышения энергоэффективности работы асинхронного двигателя путем целенаправленного изменения сочетания режимных параметров.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, энергетическая эффективность, преобразователь переменного напряжения, математическая модель, широтно-импульсная модуляция.

УЗАГАЛЬНЕНІ МОДЕЛІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ НАПРУГИ В КОЛІ СТАТОРА

М. Ю. Юхименко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: sau@kdu.edu.ua

Розглянуто питання дослідження енергоефективності асинхронного двигуна при багатофакторних варіаціях поєднань режимних і конструктивних параметрів, видів навантаження, методів модуляції напруги й параметрів перетворювача. Розроблено методику розрахунку зміни втрат в асинхронних двигунах, які працюють від перетворювачів напруги, що відрізняється врахуванням способу широтно-імпульсної модуляції напруги, частоти і шпаруватості імпульсів. Було виконано дослідження й прогнозування зміни енергоефективності роботи асинхронного двигуна під час зміни параметрів імпульсної напруги і зміни навантаження. Запропоновано методи підвищення енергоефективності роботи асинхронного двигуна шляхом цілеспрямованої зміни поєднання режимних параметрів.

Ключові слова: асинхронний двигун, енергетична ефективність, перетворювач змінної напруги, математична модель, широтно-імпульсна модуляція.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время для регулирования питающего напряжения асинхронного двигателя (АД) по частоте и амплитудному значению широкое распространение получили преобразователи модуляционного типа, использующие различные виды широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которые являются источниками высших гармоник напряжения. Повышению уровня высших гармоник способствует также увеличение числа технологических установок, работающих в импульсном режиме, различных нелинейных нагрузок и т.п. Эксплуатация АД при несинусоидальном питающем напряжении приводит к повышенному потреблению электроэнергии и снижению энергоэффективности его работы. К увеличению потерь в АД может приводить также неправильный выбор способа ШИМ напряжения и/или неудачное изменение параметров модуляции в процессе работы [1]. По указанным причинам целесообразным является

исследование влияния формы питающего напряжения на энергоэффективность АД, т.к. основная доля потерь мощности в современных частотно-управляемых электроприводах рассеивается непосредственно в АД. Поэтому разработка математических моделей энергоэффективности АД при работе от преобразователей с ШИМ напряжения является чрезвычайно важной и актуальной. Использование таких моделей может быть полезным как при разработке полупроводниковых преобразователей, систем управления и алгоритмов регулирования, так и в процессе эксплуатации и наладки систем электропривода.

В настоящее время не представляется возможным создание универсальных моделей, всесторонне и адекватно отражающих энергоэффективность работы АД и их свойства при многофакторных вариациях режимных и конструктивных параметров [6]. Поэтому обычно рассматриваются специализированные математические модели, соответствующие отдельным процессам. В этих условиях целесообразна эффективная обработка получаемых результатов и формирование достаточно простых математических количественных зависимостей. Очевидно, что обобщение результатов исследований энергоэффективности АД, работающих в различных режимах, нужно выполнять на единой методологической основе, например, путем разработки полиномиальных зависимостей энергетических показателей АД от параметров работы и эксплуатационных отклонений, удобных в практическом использовании.

Целью работы является разработка математической модели, учитывающей изменение показателей энергетической эффективности АД при изменении параметров импульсного регулятора напряжения и нагрузки на валу.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для определения степени влияния параметров ШИМ на величину потерь в АД и нахождения математических зависимостей изменения потерь в АД от параметров ШИМ питающего напряжения, принимая при этом, что зависимости потерь в АД от таких факторов, как количество импульсов на полупериоде напряжения N и скважность импульсов g при диапазонах их изменения в пределах $12 < N < 40$ и $0 < g < 1$, являются нелинейными, воспользуемся методами теории планирования эксперимента с построением планов второго порядка [2–4] и будем формировать математические зависимости от двух факторов в виде полного квадратичного полинома:

$$K_{\text{en. loss factor}} = f(N, g) = B_0 + B_1N + B_2g + B_{12}Ng + B_{11}N^2 + B_{22}g^2. \quad (1)$$

Применим рототабельные планы с точками плана в вершинах правильных многоугольников, вписанных в область единичного круга. В таком плане на основе N_0 -угольника имеется N_0 отличающихся точек на окружности с радиусом $R_1 = 1$ и n_0 совпадающих точек в центре плана (табл. 1).

Значения факторов в точках плана определяются типом многоугольника. Например, в рототабельном плане на основе шестиугольника присутствуют шесть отличающихся точек на окружности и шесть точек в центре плана (рис. 1). При построении плана первый фактор варьируется на пяти уровнях, второй – на трех уровнях. Определим соответствие именованных и кодированных факторов (табл. 2).

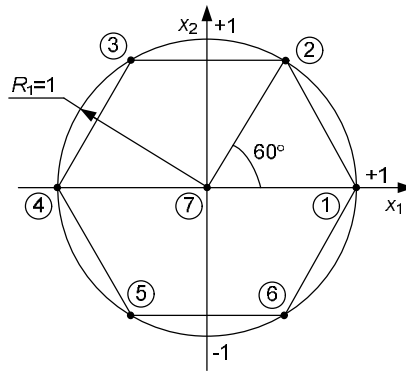


Рисунок 1 – Рототабельный план при $n = 2$ на основе правильного шестиугольника

Таблица 1 – Рототабельный план второго порядка с единичной областью планирования на основе правильного многоугольника при $n = 2$

U	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1 x_2$	$x'_4 = x_{12} - a$	$x'_5 = x_{12} - a$	
N	1	1	$\cos 0$	$\sin 0$	$\frac{\sin 0}{2}$	$\cos^2 0 - \frac{N_0}{2N}$	$\sin^2 0 - \frac{N_0}{2N}$
	2	1	$\cos \frac{2p}{N_0}$	$\sin \frac{2p}{N_0}$	$\frac{\sin \frac{4p}{N_0}}{2}$	$\cos^2 \frac{2p}{N_0} -$ $-0,5 \frac{N_0}{N}$	$\sin^2 \frac{2p}{N_0} -$ $-0,5 \frac{N_0}{N}$

	V	1	$\cos \frac{2p(V-1)}{N_0}$	$\sin \frac{2p(V-1)}{N_0}$	$\frac{\sin \frac{4p(V-1)}{N_0}}{2}$	$\cos^2 \frac{2p(V-1)}{N_0} -$ $-0,5 \frac{N_0}{N}$	$\sin^2 \frac{2p(V-1)}{N_0} -$ $-0,5 \frac{N_0}{N}$

	N_0	1	$\cos \left(2p - \frac{2p}{N_0} \right)$	$\sin \left(2p - \frac{2p}{N_0} \right)$	$\frac{\sin \left(4p - \frac{4p}{N_0} \right)}{2}$	$\cos^2 \left(2p - \frac{2p}{N_0} \right) -$ $-0,5 \frac{N_0}{N}$	$\sin^2 \left(2p - \frac{2p}{N_0} \right) -$ $-0,5 \frac{N_0}{N}$
	1	1	0	0	0	$-0,5 \frac{N_0}{N}$	$-0,5 \frac{N_0}{N}$

	W	1	0	0	0	$-0,5 \frac{N_0}{N}$	$-0,5 \frac{N_0}{N}$

n_0	1	0	0	0	$-0,5 \frac{N_0}{N}$	$-0,5 \frac{N_0}{N}$	
$\sum_{U=1}^N x_{1U}$	N	0		0	0		
$\sum_{U=1}^N x_{1U}^2$	N	$0,5N_0$		$0,125N_0$	$0,375N_0 - 0,25 \frac{N_0}{N} = 0,25N_0$		

Таблица 2 – Соответствие именованных и кодированных факторов

Факторы	Значения						
N	12	-	19	26	33	-	40
x_1	-1	-	-0,5	0	0,5	-	1
g	0	0,0670	-	0,5	-	0,933	1
x_2	-1	-0,866	-	0	-	0,866	1

Здесь N' и g' – кодированные факторы и их значения: «-1» – нижний предел варьирования; «+1» – верхний предел варьирования; «0» – среднее значение.

Рототабельный план при $n = 2$ на основе правильного шестиугольника представлен в табл. 3. В соответствии с планом на основе гармонического анализа формы напряжения выполнено семь расчетов коэффициентов возрастания суммарных потерь в АД при требуемых сочетаниях факторов, предполагая при этом пропорциональное изменение активных сопротивлений обмоток от частоты. Результаты сведены в столбец « $K_{\text{en. loss factor}}$ по гармоникам».

Таблица 3 – Рототабельный план возрастания суммарных потерь в АД для двух факторов N и g на основе правильного шестиугольника

	U	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1 x_2$	$x'_4 = x_{12} - 0,25$	$x'_5 = x_{12} - 0,25$	$K_{\text{en. loss factor}}$ по гарм.	$K_{\text{en. loss factor}}$ по полином.	$\Delta, \%$
N_0	1	1	1	0	0	0,75	-0,25	1,322	1,189	10,06
	2	1	0,5	0,866	0,433	0	0,5	1,166	1,299	-11,41
	3	1	-0,5	0,866	-0,433	0	0,5	1,172	1,039	11,35
	4	1	-1	0	0	0,75	-0,25	1,681	1,814	-7,91
	5	1	-0,5	-0,866	0,433	0	0,5	3,415	3,282	3,897
	6	1	0,5	-0,866	-0,433	0	0,5	2,264	2,397	-5,87
n_0	7	1	0	0	0	-0,25	-0,25	1,405	1,405	0
	8	1	0	0	0	-0,25	-0,25	1,405	1,405	0
	9	1	0	0	0	-0,25	-0,25	1,405	1,405	0
	10	1	0	0	0	-0,25	-0,25	1,405	1,405	0
	11	1	0	0	0	-0,25	-0,25	1,405	1,405	0
	12	1	0	0	0	-0,25	-0,25	1,405	1,405	0
$\sum_{U=1}^N x_{1U}$	12	0	0	0	0	0				
$\sum_{U=1}^N x_{1U}^2$	12	3,0	3,0	0,75	1,5	1,5				

Коэффициенты полинома в кодированных факторах определяются как

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N_0+n_0} (x_{iu} K_{\text{en. loss factor } v, u})}{\sum_{u=1}^{N_0+n_0} x_{iu}^2} \quad (2)$$

Сам квадратичный полином:

$$K_{\text{en. loss factor}} = 1,621 - 0,313\delta_1 - 0,964\delta_2 + 0,661\delta_1\delta_2 + 0,097(\delta_1^2 - 0,25) + 0,767(\delta_2^2 - 0,25). \quad (3)$$

В линейном виде:

$$K_{\text{en. loss factor}} = 1,621 - 0,313\delta_1 - 0,964\delta_2 + 0,661\delta_1\delta_2. \quad (4)$$

Степени и направления влияния факторов на функцию пропорциональны значениям и знакам коэффициентов при кодированных факторах. После математических преобразований полином (2) для именованных факторов запишется в виде:

$$K_{\text{en. loss factor}} = 5,277 - 0,09514N - 7,451g + 0,0944Ng + 0,00049N^2 + 3,0672g^2. \quad (5)$$

В линейном виде после преобразований (4)

$$K_{\text{en. loss factor}} = 4,394 - 0,0694N - 3,418g + 0,0944Ng. \quad (6)$$

Полученный полином обобщает статистический материал по расчетам потерь в АД при различных сочетаниях факторов регулятора напряжения с ШИМ. Так, для прямоугольной формы напряжения преобразователя при $N = 25$ и $g = 1$ значение $K_{\text{en. loss factor}} = 1,181$.

В соответствии с полученным полиномом были определены значения коэффициентов увеличения потерь в АД для тех же плановых точек. Результаты сведены в столбец « $K_{\text{en. loss factor}}$ полин.» (табл. 3). В последнем столбце табл. 3 приведены погрешности использования полученного полинома для плановых точек. Максимальная погрешность составляет порядка 10 %. Следовательно, поверхность функции будет иметь более сложный характер, чем поверхность второго порядка. Полином может использоваться и для определения степени возрастания потерь за пределами принятого диапазона варьирования факторов, но точность будет снижаться. Для определения шести коэффициентов полинома использовалось семь точек (опытов). Так как методы планирования эксперимента дают практически те же соотношения, что и метод наименьших квадратов, то поверхность функции проходит наиболее близко ко всем семи точкам.

Полученный полином может быть реализован в виде алгоритмов регулирования АД при работе от преобразователей с ШИМ напряжения с целью уменьшения потерь от высших гармоник. Поскольку уравнение сформировано для коэффициента увеличения потерь без указания конкретного типа двигателя, то его применение возможно для различных АД. По полученному полиному (6) на рис. 2 представлена зависимость коэффициента увеличения потерь в АД в виде поверхности отклика в факторном пространстве N и g .

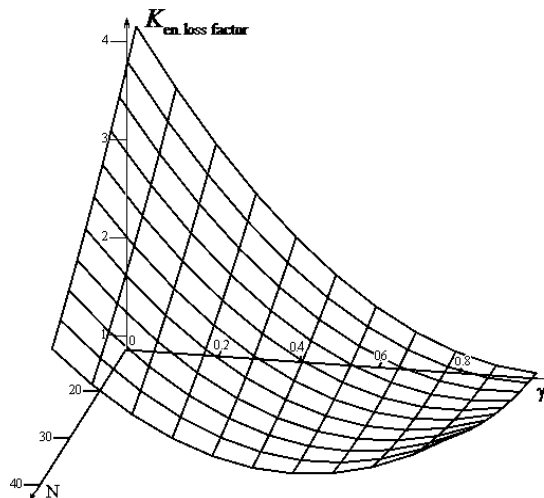


Рисунок 2 – Поверхность отклика функции $K_{\text{en. loss factor}}$ для АД с $K_s = 4$ при импульсах равной длительности и $R_n = n R_{n-1}$ в факторном пространстве N и g

На основе разработанных моделей можно проводить анализ энергоэффективности работы АД, работающих от преобразователя с ШИМ напряжения.

При выполнении сечений поверхности функции (6) плоскостями следы их пересечения представляют собой графики изменения анализируемой функции от отдельных факторов при фиксированных значениях других. На рис. 3 приведены зависимости изменения коэффициента увеличения потерь в АД от числа импульсов N на полупериоде при разной скважности g импульсов в АД с кратностью пускового тока $K_s = 4$ при работе от преобразователя с ШИМ напряжения. Величина доли электрических потерь принималась при этом равной 60 % от суммарных потерь в номинальном режиме и 25 % – потери в стали при пропорциональном изменении активного сопротивления обмоток с номером гармоники при постоянной величине механических потерь. На рис. 3 приведены зависимости изменения коэффициента увеличения потерь в АД при различном количестве N .

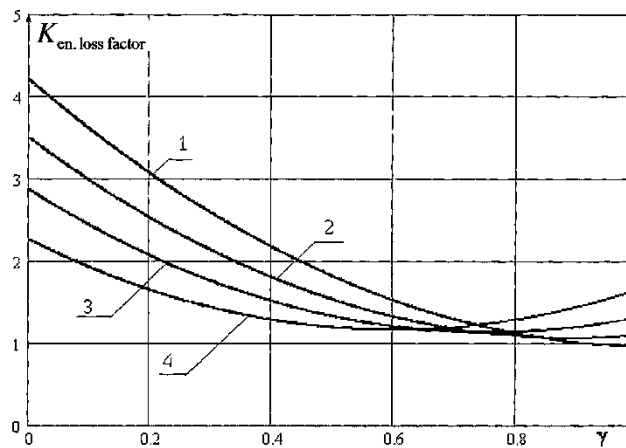


Рисунок 3 – Зависимость увеличения потерь в АД от числа импульсов N напряжения на полупериоде при скважности: 1 – $g = 0,1$; 2 – $g = 0,3$; 3 – $g = 0,6$; 4 – $g = 0,9$

Было выявлено (6), что на увеличение потерь в АД величина g оказывает в три раза большее влияние, чем значение N . Уменьшение значений g и N однозначно приводит к увеличению потерь в АД. Зависимость потерь в АД от величины g существенно нелинейна, тогда как от N – в большей степени определяется линейной зависимостью. Так как функция дополнительных потерь (6) вогнута, то для обоих факторов – числа импульсов на полупериоде и скважности – коэффициенты при квадратах факторов положительны, а при некоторых сочетаниях факторов будет наблюдаться минимум дополнительных потерь в АД. Математический анализ с целью нахождения экстремума функции, заключающийся в нахождении первой производной функции по факторам и приравнении ее нулю, приводит к соотношениям [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial K_{\text{en. loss factor}}}{\partial N} = -0,09514 + 0,0944g + 0,00098N = 0; \\ \frac{\partial K_{\text{en. loss factor}}}{\partial g} = -7,451 + 0,0944N + 6,1344g = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Отсюда следует:

$$\begin{cases} 0,00098N + 0,0944g = 0,09514; \\ 0,0944N + 6,1344g = 7,451. \end{cases} \quad (8)$$

Екстремум функції одночасно по обоим факторам знаходиться за межами прийнятих діапазонів змінення факторів, де точність представлення функції дуже груба, і не може бути коректно визначена. В той же час в прийнятих межах змінення факторів кількість імпульсів на напівперіоді напруги, що відповідає мінімуму додаткових втрат в АД, при заданій скважності імпульсів може бути визначено з перших рівнянь системи (7, 8) і формулюється в вигляді:

$$N_i = 97,08 - 96,3265g. \quad (9)$$

Залежність $N_i = f(g)$ (9) лінійна, N_i зменшується з зростанням g . Перевірка при крайніх значеннях g показує, що при $g = 0$ значення $N_i = 97$, а при $g = 1$ значення $N_i = 1$. Ці значення слідують також і з рис. 3 і узгоджуються з представленням про те, що при повному заповненні напівперіода імпульсами напруги форма напруги на напівперіоді буде прямокутною, т.е. формується тільки один імпульс і вплив вищих гармонік буде найменшим. При скважності g , близькій до нуля, додаткові втрати можуть бути зменшені при зростанні несучої частоти, т.е. числа N .

В прийнятих межах змінення факторів скважність імпульсів при модулюванні напруги g_i , що відповідає мінімуму додаткових втрат в АД, при заданій кількості імпульсів на напівперіоді може бути визначена з других рівнянь системи (7), (8) і формулюється в вигляді:

$$g_i = 1,2146 - 0,0154N. \quad (10)$$

Залежність $g_i = f(N)$ (10) лінійна, g_i зменшується з зростанням числа N . Перевірка при крайніх значеннях N показує, що при $N=12$ $g_i = 1$, а при $N=40$ $g_i = 0,6$. Ці значення слідують також і з рис. 4. При $g = 1$ всі імпульси сливаються і, задавши мінімальне $N=12$, ми отримуємо $g_i = 1$. З зменшенням g додаткові втрати зменшуються при зростанні несучої частоти, т.е. числа N .

Якщо застосовується ШІМ з другим видом модуляції, то амплітуди гармонік і, відповідно, додаткові втрати в АД будуть змінюватися. Наприклад, в результаті проведення гармонічного аналізу форми напруги при модулюванні імпульсами опорного напруги 366,3 В з постійною шириною імпульсів і при використанні розробленого управління перетворювачем з тривалістю імпульсів, що змінюється за синусоїдальним законом для $N=18$ і $g_i = 0,542$, амплітуди гармонік будуть мати значення, приведені в табл. 4 і на рис. 4.

Таблиця 4 – Амплітуди гармонік ШІМ напруги для різних способів модуляції при $N=18$, $g = 0,542$, $U = 366,3$ В

Ширина імпульсів, змінюючись за синусоїдальним законом						Постійна ширина імпульсів					
ν	$U_\nu, \text{У}$	U_ν/U	ν	$U_\nu, \text{У}$	U_ν/U	ν	$U_\nu, \text{У}$	U_ν/U	ν	$U_\nu, \text{У}$	U_ν/U
1	311,457	0,850	37	96,843	0,264	1	253,009	0,691	37	142,310	0,389
3	0,642	0,002	39	62,496	0,171	3	84,945	0,232	39	44,483	0,121
5	0,003	0,000	41	9,369	0,026	5	51,712	0,141	41	25,110	0,069
7	0,000	0,000	43	0,740	0,002	7	37,761	0,103	43	16,919	0,046
9	0,000	0,000	45	0,039	0,000	9	30,263	0,083	45	12,437	0,034
11	0,000	0,000	47	0,002	0,000	11	25,731	0,070	47	9,627	0,026

Ширина импульсов, изменяющаяся по синусоидальному закону						Постоянная ширина импульсов					
ν	U_ν, Y	U_ν/U	ν	U_ν, Y	U_ν/U	ν	U_ν, Y	U_ν/U	ν	U_ν, Y	U_ν/U
13	0,000	0,000	49	0,000	0,000	13	22,835	0,062	49	7,707	0,021
15	0,000	0,000	51	0,000	0,000	15	20,969	0,057	51	6,309	0,017
17	0,000	0,000	53	0,000	0,000	17	19,834	0,054	53	5,238	0,014
19	0,000	0,000	55	0,000	0,000	19	19,281	0,053	55	4,378	0,012
21	0,000	0,000	57	0,000	0,000	21	19,263	0,053	57	3,651	0,010
23	0,000	0,000	59	0,000	0,000	23	19,815	0,054	59	2,999	0,008
25	0,000	0,000	61	0,018	0,000	25	21,078	0,058	61	2,367	0,006
27	0,001	0,000	63	0,439	0,001	27	23,382	0,064	63	1,686	0,005
29	0,083	0,000	65	5,708	0,016	29	27,485	0,075	65	0,840	0,002
31	3,641	0,010	67	32,310	0,088	31	35,405	0,097	67	0,451	0,001
33	52,756	0,144	69	41,620	0,114	33	54,603	0,149	69	3,178	0,009
35	113,008	0,309	71	40,855	0,112	35	152,344	0,416	71	16,197	0,044

Представленные значения получены для относительной скважности $g = \left(\sum_{i=1}^N t_i \right) / (0,5T)$.

Относительная скважность не совпадает с абсолютной скважностью g' , определяемой как отношение ширины самого продолжительного импульса $t_{1\max}$ в середине полупериода к T , т.е. $g' = t_{1\max} / T$. Действительно, даже если в середине полупериода $t_{1\max} = T$ и $g' = 1$, то ширина остальных импульсов, расположенных ближе к краям полупериода, будет меньше T и для разработанного способа управления преобразователем на полупериоде при $g' = 1$ $g = 2/p = 0,637$, т.е. относительная скважность при таком способе модулирования не может быть больше 0,637.

Опорное напряжение подобрано таким ($U = 366,3$ В), чтобы при $N = 18$ и $g = 0,542$ амплитуда напряжения первой гармоники при модуляции напряжения импульсами с использованием разработанного способа управления преобразователем напряжения составляла $U_1 = 311 = 220\sqrt{2}$ В. В этом случае можно проводить анализ энергоэффективности работы АД при синусоидальном питающем напряжении с действующим напряжением 220 В (амплитудное 311 В) и при работе от преобразователя с ШИМ напряжения с параметрами $U = 366,3$ В, $N = 18$ и $g_i = 0,542$, обеспечивающими такое же значение напряжения первой гармоники.

Из табл. 4 и рис. 5 следует наблюдаемое снижение амплитуд высших гармоник для способа модуляции напряжения импульсами при использовании разработанного способа управления преобразователем напряжения по сравнению со способом ШИМ импульсами постоянной ширины. При этом можно ожидать и снижения дополнительных потерь в АД, вызванных влиянием высших гармоник.

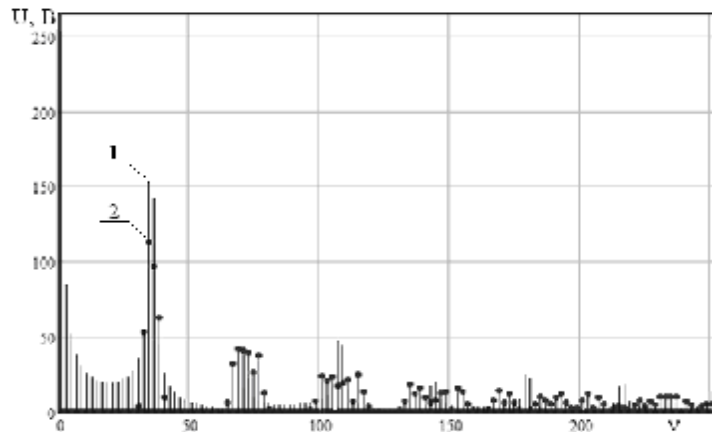


Рисунок 4 – Амплитуди гармоник напруги при модуляції імпульсами напруги 366,3 В з рівної (1) і з змінюючої по синусоїдальному закону (2) шириною імпульсів при значеннях $N=18$ і $g=0,542$

В цілях сравнительного расчетного анализа рассмотрен АД общепромышленного исполнения АИР180М4У3 30 кВт, 220/380 В, имеющий при работе в номинальном режиме от сети с синусоидальным напряжением потери в обмотках 2079 Вт, потери в стали 572 Вт, механические потери 192 Вт, КПД в номинальном режиме $h = 0,915$ и кратность пускового тока $K_s = 7$. Очевидно, что при $K_s = 7$ электрические потери в обмотках АД от высших временных гармоник тока будут больше аналогичных потерь, чем при $K_s = 4$, в $7^2 / 4^2 = 3,0625$ раза.

Аналогично были сформированы на основе правильного шестиугольника рототабельные ортогональные центрально-композиционные планы второго порядка, выполнен гармонический анализ для отличающихся семи плановых точек, определены величины увеличения потерь в АД в этих точках, рассчитаны коэффициенты полиномов для случаев работы АД от преобразователя с ШИМ напряжения с двумя способами импульсного модулирования – варианта ШИМ с одинаковой шириной импульсов и при использовании разработанного способа управления полупроводниковым преобразователем. Полученные математические модели представляются в виде следующих полиномов:

– для варианта с разработанным способом управления ключами преобразователя в именованных факторах для относительной скважности

$$K_{\text{en.loss factor}} = 14,70 - 0,3462N - 21,48g + 0,2407Ng + 0,0027N^2 + 8,587g^2, \quad (11)$$

а для абсолютной скважности полином преобразуется в соотношение

$$K_{\text{en.loss factor}} = 9,36 - 0,126N - 7,79g' + 0,087Ng' + 0,001N^2 + 3,216g'^2; \quad (12)$$

– для варианта ШИМ с постоянной шириной импульсов полином имеет вид:

$$K_{\text{en.loss factor}} = 20,51 - 0,506N - 26,76g + 0,308Ng + 0,424N^2 + 10,63g^2. \quad (13)$$

Можно отметить подобия полиномов (12) и (5), полученных для разных способов модулирования напряжения импульсами при $K_{\tau} = 4$ и $K_{\tau} = 7$.

По полученным моделям (11), (13) на рис. 5 представлены зависимости коэффициента увеличения потерь в АД в виде поверхности отклика в факторном пространстве N и g для различных способов импульсной модуляции напряжения. Увеличение K_{τ} до семи, по сравнению с $K_s = 4$, резко увеличивает дополнительные потери в АД от высших временных гармоник [6]. Чем меньше число N и величина g , тем выше потери в АД и меньше КПД.

При формировании выходного напряжения с использованием предложенного способа управления КПД АД выше, чем при равномерной ШИМ с импульсами постоянной ширины. Аналогично рис. 3 можно представить графики изменения коэффициента увеличения потерь в АД от N при различных g и зависимость потерь от скважности g при различном числе N . Характер графиков при этом не изменяется. Также можно провести анализ математических моделей на поиск экстремумов, но в этом случае изменятся только конкретные числа.

Сравнительный анализ моделей показывает, что при прочих равных условиях увеличение потерь в АД при работе с использованием разработанного способа управления с переменной длительностью импульсов составляет в среднем на 37 % меньше, чем при ШИМ с постоянной шириной импульсов. Кроме того, для создания напряжения с первой гармонической, равной амплитуде синусоидального напряжения сети, для ШИМ с постоянной шириной импульса требуется большее напряжение, чем для предлагаемого способа управления преобразователем.

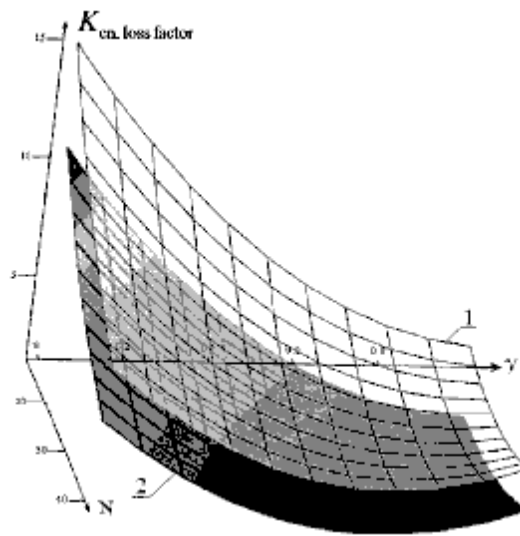


Рисунок 5 – Изменение $K_{en.loss\ factor}$ для АД с $K_s = 7$ и $R_v = n$ $R_{v=1}$

в факторном пространстве N и g при: 1 – модулировании напряжения импульсами равной длительности; 2 – модулировании напряжения импульсами синусоидально изменяющейся длительности

Изменения потерь и КПД в рассмотренном АД при $g = 0,542$ и $N = 18$ для разных способов модуляции напряжения представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Зависимость изменения потерь и КПД АД при различных способах управления преобразователем напряжения

Работа АД при питании от:		$P_2 = 0,25P_n$	$P_2 = 0,5P_n$	$P_2 = 0,75P_n$	$P_2 = P_n$	$P_2 = 1,25P_n$
Сети синусоидального напряжения 220 В	$P_{el.}$	203,13	548,19	1149,79	2079,33	3344,30
	$P_{st.}$	571,75	571,75	571,75	571,75	571,75
	h	0,884	0,917	0,922	0,913	0,901
При использовании разработанного способа управления с $U = 366,3$ В $g = 0,542$ и $N = 18$	$P_{el.}$	282,36	761,98	1598,21	2890,27	4648,58
	$P_{st.}$	618,07	618,07	618,07	618,07	618,07
	h	0,871	0,903	0,900	0,886	0,868

Работа АД при питании от:		$P_2 = 0,25P_n$	$P_2 = 0,5P_n$	$P_2 = 0,75P_n$	$P_2 = P_n$	$P_2 = 1,25P_n$
Для ШИМ с постоянной шириной импульсов при $U = 366,3$ В, $g = 0,542$, $N = 18$	P_{el}	512,71	1383,62	2902,07	5248,23	8441,02
	P_{st}	719,27	719,27	719,27	719,27	719,27
	h	0,838	0,865	0,852	0,826	0,796

Уменьшение КПД АД с $K_n = 7$ при работе от преобразователя с ШИМ напряжения с постоянной шириной импульсов при $U=366,3$ В, $g = 0,542$ и $N = 18$ изменяется в зависимости от нагрузки и может достигать 9 % [7]. Таким образом, на основе разработанных математических моделей исследована энергетическая эффективность АД и оценены пределы ее изменения при работе АД от преобразователей с ШИМ напряжения, в зависимости от способа модуляции напряжения, числа импульсов на периоде и скважности импульсов.

ВЫВОДЫ. В работе рассмотрены математические модели энергетической эффективности АД с преобразователем напряжения в цепи статора, базирующиеся на использовании рототабельного ортогонально-композиционного плана второго порядка на основе правильного шестиугольника в виде полных квадратичных полиномов, в зависимости от скважности и частоты модуляции напряжения на полупериоде. При этом были получены следующие результаты:

- показано, что повышение энергоэффективности работы АД при эксплуатации может быть достигнуто за счет целенаправленного изменения величины питающего напряжения, способа и параметров широтно-импульсной модуляции напряжения;
- на основе ортогональных центрально-композиционных планов второго порядка были разработаны в виде полных квадратичных полиномов математические модели энергоэффективности работы АД;
- на основе разработанных математических моделей было проведено исследование энергоэффективности работы АД серии 4А различной мощности;
- установлено, что дополнительные потери в обмотках и магнитопроводе в АД, работающих от ШИМ-преобразователя напряжения, возрастают существенно нелинейно с уменьшением частоты модуляции напряжения в течение полупериода;
- изменение скважности импульсов оказывает приблизительно в три раза большее влияние на изменение дополнительных потерь в АД, чем изменение частоты модуляции преобразователя на протяжении полупериода выходного напряжения;
- уменьшение КПД АД с $P_n=30$ кВт при его работе от преобразователя напряжения с ШИМ при постоянной ширине импульсов, $U = 366,3$ В и $N = 18$ изменяется в зависимости от величины момента нагрузки и может достигать 9 % при номинальной нагрузке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов–Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
2. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1971. – 185 с.
3. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. – Минск: Издательство БГУ, 1982. – 302 с.
4. Мойсюк Б.Н. Основы теории планирования эксперимента: Учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 464 с.
5. Казаков Ю.Б., Андреев В.А. Исследование влияния колебания напряжений сети на энергетические показатели асинхронных двигателей // Материалы V Российской научно-

технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск: УЛГТУ, 2006. – Т. 1. – С. 131–134.

6. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.

7. Маршак Е.Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей. – М.: Энергия, 1976. – 147 с.

GENERALIZED MODELS OF POWER EFFICIENCY OF INDUCTION MOTOR, WITH VOLTAGE CONVERTERS IN CIRCUIT OF STATOR

M. Yukhimenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: saue@kdu.edu.ua

The questions of design and research of power efficiency are consider induction motors at multivariable variations of combinations of regime, types of loading, method of voltage modulation and parameters of pulse voltage converter. The method of calculation of changes of losses in induction motors, with voltage converters in circuit of stator is developed, different the account of method pulse-width modulation of voltage, frequency and duty cycle. Research and prognostication of change power efficiency of work was executed induction motors at the change of parameters of impulsive and unnominal feed-in voltage and loading. The methods of increase of power efficiency of work are offered induction motors by the purposeful change of combination of regime.

Key words: induction motor, AC voltage converter, quality of transformation of energy, mathematical model, pulse-width modulation.

REFERENCES

1. Ivanov–Smolensky A.V. *Electrical Machines: Textbook for high schools*. – Moscow: Energiya, 1980. – 928 p. [in Russian]

2. Ivobotenko B.A., Ilyinsky N.F., Kopylov I.P. *Design of experiments in electrical engineering*. – Moscow: Energiya, 1971. – 185 p. [in Russian]

3. Krasovskiy G.I., Filaretov G.F. *Design of experiments*. – Minsk: Izdat. BSU, 1982. – 302 p. [in Russian]

4. Moysyuk B.N. *Fundamentals of the theory of experimental design: the manual*. – Moscow: Publishing MEI, 2005. – 464 p. [in Russian]

5. Cosackov J.B., Andreev V.A. Study the effects of fluctuations in the mains voltage energy performance of asynchronous motors // *Proceedings of V Russian scientific and technical conference "Energy efficiency in municipal services, energy, industry"*. – Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2006. – Т. 1. – PP. 131–134. [in Russian]

6. Kopylov I.P. *Electrical Machines: Textbook for schools*. – Moscow: Vishaya shkola, 2002. – 607 p. [in Russian]

7. Marshak E.L. *Repair and modernization of induction motors*. – Moscow: Energiya, 1976. – 147 p. [in Russian]



Юхименко Михаил Юрьевич,
ст. препод. кафедры «Системы автоматического управления и электропривод» КрНУ,
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,
Тел. (05366) 3-11-47,
E-mail: saue@kdu.edu.ua

Стаття надійшла 24.12.2012
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.