

УДК 621.313

ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ОТ ПАРАМЕТРОВ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

КАЗАКОВ Ю.Б., д-р техн. наук, ШУМИН А.А., асп., АНДРЕЕВ В.А., инж.

Выполнен анализ изменения потерь в асинхронных двигателях при работе от широтно-импульсного регулятора напряжения. С использованием методов планирования эксперимента сформирована функциональная зависимость коэффициента увеличения потерь в асинхронных двигателях от числа и скважности импульсов напряжения на периоде.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, коэффициент увеличения электрических потерь, рототабельный план второго порядка.

THE DEPENDENCE OF LOSS IN ASYNCHRONOUS MOTORS ON PULSE-DURATION VOLTAGE VARIATION PARAMETRES

KAZAKOV Yu.B., Ph.D., SHUMIN A.A., postgraduate, ANDREEV V.A., eng.

The article contains the analysis of loss changes in asynchronous motors during their work with pulse-duration voltage variation. Using experiment planning methods the functional dependence of loss increase coefficient in asynchronous motors on the number and the on-off time impulse ratio was defined.

Key words: asynchronous motors, electric loss increase coefficient.

Регулирование напряжения, подводимого к асинхронному двигателю (АД), часто выполняется с применением широтно-импульсного модулирования (ШИМ). Неправильный выбор преобразователя напряжения и/или неудачное изменение параметров ШИМ во время регулирования могут приводить к повышенному потреблению энергии.

В преобразователях с ШИМ входное напряжение U модулируется высокочастотными сигналами, импульсы сменяются паузами (рис. 1). Среднее напряжение за полупериод определяется как

$$U_{\text{ср}} = U(\sum \tau) / (0,5T) = \gamma U,$$

где $\sum \tau$ – сумма проводящих N отрезков времени (импульсов) за полупериод $T/2$; $\gamma = (\sum \tau)/(0,5T)$ – коэффициент заполнения (скважность), меняется в диапазоне 0–1.

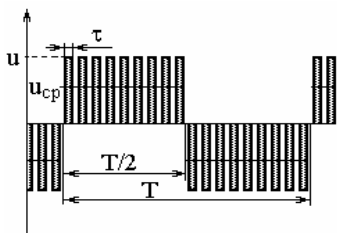


Рис. 1. Форма напряжения ШИМ

Применяется модуляция заданным числом N однополярных и/или разнополярных импульсов на полупериоде с одинаковой, но регулируемой скважностью. Также применяют ШИМ с одинаковой шириной импульсов и пауз, но с регулируемым числом импульсов за период [1, 2]. Обычно в устройствах регулирования принимают меры по уничтожению третьей гармоники. В настоящее время преобразователи с ШИМ напряжения выпускаются с несущей частотой 2–16 кГц. Для частоты ШИМ 16 кГц при максимальной рабочей частоте 400 Гц $N = 40$, для рабочей частоты 50 Гц – $N = 320$.

Гармонический состав спектра напряжения зависит от способа модуляции, отношения несущей

частоты к рабочей частоте и др. Для снижения высших гармоник напряжения увеличивают N , т.е. частоту модуляции. Ее делают не меньше чем в 12 раз выше частоты основной гармонической инвертора. С ростом частоты модуляции растут потери на коммутацию полупроводниковых элементов. Верхний предел частоты модуляции ограничен необходимостью обеспечивать длительность паузы, необходимой для восстановления запирающей функции полупроводникового элемента.

Добавочные потери в обмотках и в стали магнитопровода АД возникают от действия высших гармоник тока и магнитного потока, созданного высшими временными гармониками питающего напряжения [4, 5]. Это увеличивает нагрев двигателя и снижает мощность и момент на валу.

При анализе работы АД с ШИМ напряжения часто используется метод усреднения мгновенных значений в пределах периода несущей частоты [3]. Очевидно, что гармонический состав выходного напряжения в виде прямоугольника с высотой $U_{\text{ср}}$ отличается от гармонического состава напряжения в виде серии импульсов. Соответственно преобразователь с ШИМ напряжения в отличие от прямоугольной формы напряжения будет вызывать другие потери в АД.

Таким образом, выявление степени влияния параметров ШИМ (N и γ) на потери в АД, установление функциональной зависимости являются актуальной задачей. Это будет полезно разработчикам преобразователей, АД, наладчикам и операторам установок. Сформированные зависимости могут быть заложены в алгоритмы регулирования АД в целях уменьшения потерь от высших гармоник и позволят выполнять оценку потерь при разных законах управления в выпускаемых преобразователях.

Потери в обмотках и стали АД зависят от частот и амплитуд гармоник тока и напряжения. Будем разлагать форму напряжения в гармонический ряд и исследовать отдельно действие в АД всех гармоник. Каждая гармоника ν напряжения вызывает гармонику тока статора, который создает свое магнитное поле, вращающееся с частотой в ν раз выше частоты вращения первой гармоники. Магнит-

ное поле ν -й гармоники индуцирует в роторе свой ток, создает свой асинхронный момент. Значения потерь и моментов можно определить по методике [4, 5], предложенной для прямоугольной волны напряжения и соответствующего ей спектра гармоник. Доработаем методику для произвольно заданного спектра гармоник напряжения.

Скольжение ν -й гармоники определяется как $s_\nu = [\nu \pm (1 - s_1)] / \nu$.

В режимах работы АД от холостого хода до номинального при $0 < s_1 < 0,02-0,05$ скольжение для высших гармоник можно принять равным единице ($s_\nu \approx 1$).

Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора $X_{1\nu}$ и ротора $X'_{2\nu}$ АД для ν -й гармоники пропорциональны номеру гармоники:

$$X_{1\nu} = \nu X_1; \quad X'_{2\nu} = \nu X'_2.$$

В машинах средней и большой мощности при высоких частотах для $\nu \geq 5$ при $s_\nu \approx 1$ имеет место сильное вытеснение тока, вследствие чего активные сопротивления увеличиваются пропорционально номеру гармоники [4]:

$$R_{1\nu} = \nu R_1; \quad R'_{2\nu} = \nu R'_2.$$

В связи с работой АД по отношению к высшей гармонике в режиме короткого замыкания ($s_\nu \approx 1$), небольшой амплитудой напряжения этой гармоники U_ν и повышенной ее частотой ($\nu \geq 5$) током намагничивания в схеме замещения для этой гармоники можно пренебречь. Тогда ток ν -й гармоники определяется формулой

$$I_\nu = \frac{U_\nu}{\nu \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

Электрические потери в обмотках АД от тока высшей гармоники равны

$$\Delta P_{эл.\nu} = \frac{m_1 U_1^2 (U_\nu / U_1)^2 (R_1 + R'_2) \nu}{\nu^2 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]} = \frac{\Delta P_{эл.к}}{\nu} \left(\frac{U_\nu}{U_1} \right)^2,$$

где $\Delta P_{эл.к}$ – электрические потери в обмотках двигателя в режиме короткого замыкания при номинальном напряжении для первой гармоники:

$$\Delta P_{эл.\nu} = \frac{K_n^2 \Delta P_{эл.ном}}{\nu} \left(\frac{U_\nu}{U_1} \right)^2.$$

Здесь $\Delta P_{эл.ном}$ – электрические потери в обмотках в номинальном режиме для первой гармоники; K_n – кратность пускового тока. Для общепромышленных АД $K_n = 5-7$, для частоторегулируемых АД $K_n = 3-5$.

Коэффициент увеличения электрических потерь в обмотках АД от токов высших гармоник равен

$$K_{эл} = \left(\Delta P_{эл.ном} + \sum_{\nu=5}^{\infty} \Delta P_{эл.\nu} \right) / \Delta P_{эл.ном} = 1 + K_n^2 \sum_{\nu=5}^{\infty} \left[\frac{1}{\nu} \left(\frac{U_\nu}{U_1} \right)^2 \right].$$

При прямоугольной форме напряжения амплитуды гармоник обратно пропорциональны номеру гармоники (рис. 2). При $K_n = 3-5$ и прямоугольной форме напряжения имеем $K_{эл} = 1,11-1,3$, что соотносится с известными данными [4, 5] и свидетельствует о корректности подхода.

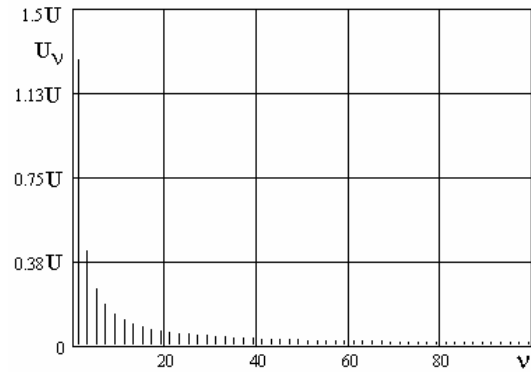


Рис. 2. Амплитуды гармоник напряжения прямоугольной формы

Магнитные потери в стали $\Delta P_{ст.\nu}$ определяются следующим образом:

$$\Delta P_{ст.\nu} \approx B_\nu^2 f_\nu^{1,3},$$

$$\text{где } B_\nu \approx \frac{U_\nu}{f_\nu} = \frac{U_1}{f_1 \nu} \frac{U_\nu}{U_1}.$$

По отношению к потерям в стали от первой гармоники $\Delta P_{ст.1}$

$$\Delta P_{ст.\nu} = \Delta P_{ст.1} \left(\frac{U_\nu}{U_1} \right)^2 \frac{1}{\nu^{0,7}}.$$

Коэффициент увеличения потерь в стали магнитопровода АД от действия высших гармоник напряжения равен

$$K_{ст} = \left(\Delta P_{ст.1} + \sum_{\nu=5}^{\infty} \Delta P_{ст.\nu} \right) / \Delta P_{ст.1} = 1 + K_{высш.г.г.р.м.ст} \sum_{\nu=5}^{\infty} \left[\frac{1}{\nu^{0,7}} \left(\frac{U_\nu}{U_1} \right)^2 \right].$$

Для прямоугольной формы напряжения потери в стали магнитопровода АД от действия высших гармонических потока невелики, возрастание суммарных потерь в стали незначительно (не более чем на 2-3 %) [4]. Однако при другом гармоническом составе напряжения, выдаваемого регулятором с ШИМ напряжения, возрастание потерь в стали может быть другим.

Электрические потери в обмотках АД составляют в среднем около 60 %, а потери в стали магнитопровода асинхронного двигателя – 25 % общих потерь [4]. Тогда суммарные потери в асинхронных двигателях с учетом действия высших гармонических напряжения при неизменности механических потерь составляют

$$\sum \Delta P' = \sum \Delta P_{ном} \left\{ \begin{aligned} &1 + 0,6 K_n^2 \sum_{\nu=5}^{\infty} \left[\frac{1}{\nu} \left(\frac{U_\nu}{U_1} \right)^2 \right] + \\ &+ 0,25 K_{высш.г.г.р.м.ст} \sum_{\nu=5}^{\infty} \left[\frac{1}{\nu^{0,7}} \left(\frac{U_\nu}{U_1} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\},$$

где $\sum P_{ном}$ – суммарные потери в АД от действия первой гармоники напряжения.

Если принять $K_n^2 = 16$ и $K_{высш.г.г.р.м.ст} = 2,5$, то коэффициент возрастания потерь в АД от действия высших гармонических напряжения и тока вследст-

вие ШИМ напряжения при неизменности механических потерь равен

$$K_{ув.потерь.АД} = \frac{\sum \Delta P'}{\sum \Delta P_{ном}} = 1 + \sum_{v=5}^{\infty} \left\{ \left(\frac{9,6}{v} + \frac{0,625}{v^{0,7}} \right) \left(\frac{U_v}{U_1} \right)^2 \right\}$$

Амплитуды гармоник выходного напряжения регулятора с ШИМ напряжения могут быть определены из гармонического анализа. Например, для $N = 12$ и $\gamma = 0,2$ форма напряжения ШИМ была разложена на 4425 гармоник с амплитудами не менее 0,0008 амплитуды первой гармоники (рис. 3). Для такого гармонического состава коэффициент возрастания потерь в АД составил $K_{ув.потерь АД} = 2,689$, при этом коэффициент увеличения электрических потерь в обмотках АД составил $K_{эл} = 3,392$, а коэффициент увеличения потерь в стали магнитопровода АД – $K_{ст} = 2,015$.

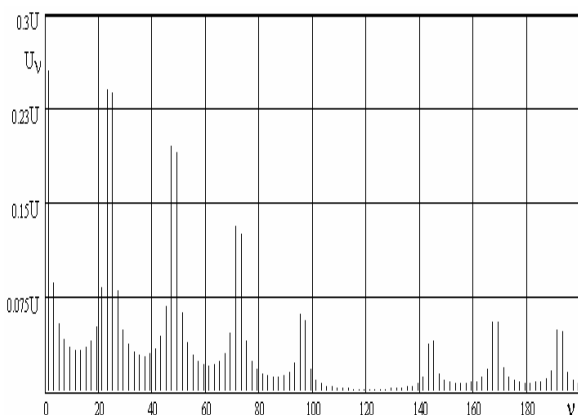


Рис. 3. Амплитуды гармоник ШИМ напряжения при $N = 12$ и $\gamma = 0,2$, полученные средствами гармонического анализа на ЭВМ

Для других сочетаний параметров ШИМ (N и γ) необходимо выполнение новых объемных расчетов гармонического состава напряжения и дополнительных потерь в АД от высших гармоник, что может оказаться затруднительным. Более того, количественные значения потерь АД для одного сочетания параметров ШИМ сами по себе не указывают направления изменений потерь АД при изменении параметров ШИМ. Для исследования нелинейных зависимостей потерь в АД от параметров ШИМ (факторов N и γ при диапазонах их изменения $12 < N < 40$ и $0 < \gamma < 1$) использованы методы планирования эксперимента.

Применен рототабельный план второго порядка с точками плана в вершинах правильных многоугольников, вписанных в область единичного круга [6, 7, 8], позволяющий сформировать функциональные зависимости в виде полного квадратичного полинома.

В рототабельном плане на основе шестиугольника присутствуют 6 отличающихся точек на единичной окружности и несколько совпадающих точек в центре плана (рис. 4). В соответствии с принятым планом на основе шестиугольника определяем соответствие именованных и кодированных факторов (табл. 1).

В соответствии с планом при различных сочетаниях N и γ на основе разложений каждой формы напряжения в свой гармонический ряд (4000–5000 гармоник) по представленной выше методике выполнены расчеты коэффициентов возрастания потерь в АД. Результаты сведены в столбец $K_{ув.потерь}$ (по гарм.) табл. 2.

Рис. 4. Рототабельный план при $n = 2$ на основе шестиугольника: N' и γ' – кодированные факторы; «-1» – нижний предел варьирования; «+1» – верхний предел варьирования; «0» – среднее значение

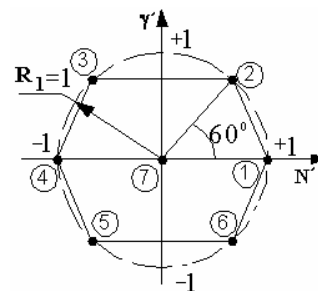


Таблица 1. Соответствие именованных и кодированных факторов плана

Факторы	Значения факторов						
N	12	–	19	26	33	–	40
N'	–1	–	–0,5	0	0,5	–	1
γ	0	0,0670	–	0,5	–	0,933	1
γ'	–1	–0,866	–	0	–	0,866	1

Таблица 2. Рототабельный план на основе правильно-го шестиугольника

N'	γ'	$K_{ув.потерь.АД}$ (по гарм.)	$K_{ув.потерь.АД}$ (по полин.)	Δ , %
1	0	1,322	1,189	10,061
0,5	0,866	1,166	1,299	–11,406
–0,5	0,866	1,172	1,039	11,345
–1	0	1,681	1,814	–7,912
–0,5	–0,866	3,415	3,282	3,897
0,5	–0,866	2,264	2,397	–5,872
0	0	1,405	1,405	0

Коэффициенты полинома и сам полином в кодированных факторах определяются по соотношениям, приведенным в [8]:

$$K_{ув.потерь.АД} = 1,621 - 0,313N' - 0,964\gamma' + 0,661N'\gamma' + 0,097N'^2 + 0,767\gamma'^2$$

Степень влияния факторов на функцию пропорциональна значениям и знакам коэффициентов при кодированных факторах. Из этого следует, что на увеличение потерь в АД скажность оказывает в три раза большее влияние, чем число импульсов на полупериоде. Уменьшение γ и N приводят к увеличению потерь в АД. Зависимость потерь в АД от γ существенно нелинейна, тогда как от N – в большей степени линейна. Для обоих факторов коэффициенты при квадратах факторов положительны, поверхность вогнута.

Для именованных факторов полином имеет вид

$$K_{ув.потерь.АД} = 5,277 - 0,09514N - 7,451\gamma + 0,0944N\gamma + 0,00049N^2 + 3,0672\gamma^2$$

Полученный полином обобщает материал по точным, но объемным расчетам потерь в АД при разных сочетаниях факторов регулятора напряжения с ШИМ. В соответствии с полученным полиномом были определены значения коэффициентов увеличения потерь. В последнем столбце табл. 3 даны погрешности использования полинома в плановых точках. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента увеличения потерь в АД в виде поверхности в факторном пространстве N и γ .

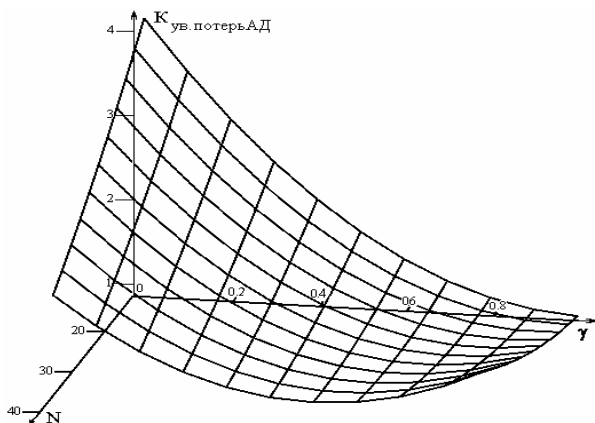


Рис. 5. Поверхность отклика $K_{ув.потерьАД}$ в факторном пространстве

Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными [9]. Показано, что мощность АД при работе от преобразователя с ШИМ напряжения снижается на 10–25 %, момент на валу – до 20 %. По увеличению температуры корпу-

са сделан вывод об увеличении потерь в АД. Средний коэффициент изменения потерь в зависимости от N составил 0,085 (из полинома 0,095).

Список литературы

1. **Забродин Ю.С.** Автономные тиристорные инверторы с широтно-импульсным регулированием. – М.: Энергия, 1977.
2. **Булгаков А.А.** Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергоиздат, 1982.
3. **Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н.** Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.
4. **Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е.** Электрические машины: Асинхронные машины: Учебник для электромех. спец. вузов; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988.
5. **Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / В.И. Радин, И. Лондин, В.Д. Розенкноп и др.; Под ред. В.И. Радина.** – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. **Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П.** Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1971.
7. **Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф.** Планирование эксперимента. – Мн.: Изд-во БГУ, 1982.
8. **Казаков Ю.Б.** Методы планирования в электромеханике // <http://www.ispu.ru/library/lessons/kazakov>.
9. **Андреианов М.В., Родионов Р.В.** Экспериментальные исследования энергетических показателей частотно-регулируемых асинхронных двигателей, работающих от полигармонических источников напряжения // Электротехника – 2006. – № 11. – С. 15–22.

Казаков Юрий Борисович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-04,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Шумин Алексей Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-04,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Андреев Владимир Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-04,
e-mail: elmash@em.ispu.ru