

УДК 621.313

Моделирование энергоэффективности тягового асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения

Ю.Б. Казаков, Н.К. Швецов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время расчет потерь и анализ энергоэффективности асинхронных двигателей при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения производится упрощенно – без учета спектра гармоник питающего напряжения. В связи с этим целесообразна разработка уточненных методик анализа энергоэффективности таких асинхронных двигателей.

Материалы и методы: Используются методы гармонического анализа, теории электрических машин, конечно-элементного моделирования электромагнитного поля.

Результаты: Выявлены реальные спектры гармоник питающего напряжения. На основе численного расчета электромагнитного поля определены частотные зависимости параметров двигателя. С их использованием рассчитаны коэффициенты увеличения потерь в двигателе при различных формах питающего напряжения.

Выводы: Полученные результаты подтверждены конечно-элементным расчетом модели двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, широтно-импульсная модуляция напряжения, дополнительные потери, коэффициент увеличения потерь.

Energy Efficiency Simulation of Tractive Asynchronous Motor while Frequency Converter Supplying with Pulse Width Voltage Modulation

Yu.B. Kazakov, N.K. Shvetsov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Nowadays, losses calculation and energy efficiency analysis of asynchronous motors being supplied by a frequency converter with pulse width voltage modulation is provided simplistically, that means without considering the harmonic spectrum of supply voltage. According to this, it is reasonable to develop the accurate methods of energy efficiency analysis of such asynchronous motors.

Materials and methods: The methods of harmonics analysis, electric machines theory, the method of finite-element simulation are used in the article.

Results: The real harmonic spectra of supply voltage are revealed. The frequency dependencies of motor parameters are defined on the basis of numeric calculation. The additional losses coefficients in the engine at various forms of supply voltage are calculated according to them.

Conclusions: The obtained results are verified with the finite-element calculation of the engine model.

Key words: asynchronous motor, pulse width voltage modulation, additional losses, rate of increase losses.

В настоящее время питание асинхронных двигателей (АД) зачастую производится от полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ), выходное напряжение которых формируется по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это позволяет производить точное и экономичное регулирование скорости вращения АД в широких пределах. Необходимая амплитуда первой гармоники сигнала на выходе ПЧ обеспечивается изменением параметров ШИМ: числа импульсов на полупериоде основной частоты (N) и скважности импульсов (γ). Помимо основной гармоники, сигнал на выходе ПЧ содержит спектр высших гармонических, которые вызывают в АД дополнительные потери. Это ведет к повышенному энергопотреблению двигателя, к перегреву

его активных частей. Актуальной является задача расчета дополнительных потерь в АД, создаваемых высшими гармоническими питающего напряжения.

Для приближенного учета дополнительных потерь от высших гармоник зачастую применяют методику, основанную на усреднении мгновенных значений напряжения на периоде несущей частоты ШИМ [1].

Более точная методика основывается на разложении кривой питающего напряжения в гармонический ряд, что позволяет учитывать действие каждой гармоники [2]. Энергоэффективность работы АД от ПЧ с ШИМ напряжения оценивается путем введения коэффициента суммарного увеличения потерь ($K_{\text{сум}}$) – отноше-

ния потерь в двигателе при питании импульсным напряжением к потерям при питании синусоидальным напряжением. В предположении о прямой пропорциональности активных и индуктивных сопротивлений обмоток АД частоте вследствие выраженного действия эффекта вытеснения тока в двигателях средней и большой мощности, коэффициенты увеличения электрических потерь ($K_{эл}$) и потерь в стали ($K_{ст}$) можно определить из следующих соотношений [3]:

$$K_{эл} = \left(P_{эл.ном} + \sum_{v=5}^{\infty} P_{эл.v} \right) = 1 + K_{п}^2 \cdot \sum_{v=5}^{\infty} \left[\frac{1}{v} \left(\frac{U_v}{U_1} \right)^2 \right],$$

где $P_{эл.ном}$, $P_{эл.v}$ – электрические потери от действия первой и v -й гармоник соответственно; $K_{п}$ – кратность пускового тока; U_v , U_1 – амплитуды v -й и первой гармоник напряжения соответственно;

$$K_{ст} = \frac{\left(P_{ст.ном} + \sum_{v=5}^{\infty} P_{ст.v} \right)}{P_{ст.ном}} = 1 + K_{высш.гарм.ст} \times \sum_{v=5}^{\infty} \left[\frac{1}{v^{0,7}} \left(\frac{U_v}{U_1} \right)^2 \right],$$

где $P_{ст.ном}$, $P_{ст.v}$ – потери в стали от действия первой и v -й гармоник соответственно; $K_{высш.гарм.ст} = 2-3$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали при перемагничивании по частичным циклам.

Коэффициент суммарного увеличения потерь АД от действия высших гармоник напряжения и тока рассчитывается как

$$K_{сум} = \frac{P_{эл.ном}}{P_{сум.ном}} K_{эл} + \frac{P_{ст.ном}}{P_{сум.ном}} K_{ст}.$$

Согласно проведенному расчету коэффициентов увеличения потерь в тяговом АД: $P_{ном} = 170$ кВт, $U_{ном} = 530$ В, $f = 43$ Гц, $\eta_{ном} = 0,92$, $K_{п} = 7$, $P_{эл.ном} = 10704,64$ Вт, $P_{ст.ном} = 2027,74$ Вт, $P_{мех} = 1435,66$ Вт. Расчет проводился для следующих форм импульсного напряжения (рис. 1): с постоянной шириной импульсов; с синусоидально изменяющейся шириной импульсов; с синусоидально изменяющейся высотой импульсов; с импульсно-ступенчатой высотой импульсов.

Расчет проведен при параметрах ШИМ $N = 10$, $\gamma = 0,542$. Амплитуда импульсов в каждом случае подобрана таким образом, чтобы амплитуда первой гармоники импульсного напряжения была равна амплитуде номинального синусоидального напряжения. Спектры гармоник импульсного напряжения приведены на рис. 2–5.

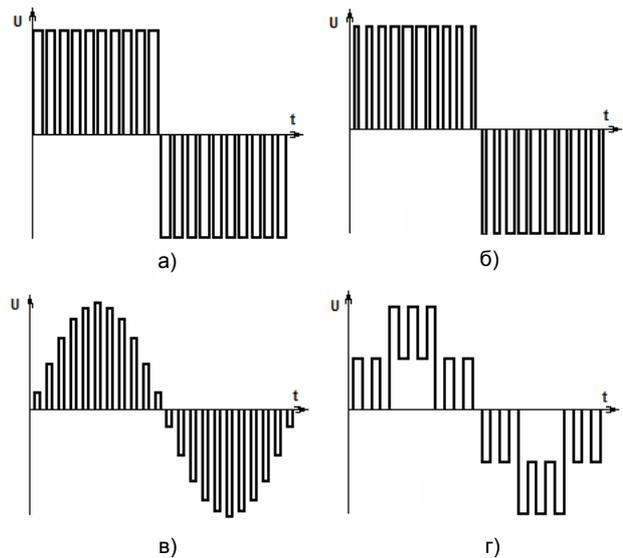


Рис. 1. Формы импульсного напряжения: а – импульсы напряжения постоянной ширины; б – импульсы напряжения с синусоидально изменяющейся шириной; в – импульсы напряжения с синусоидально изменяющейся высотой; г – импульсно-ступенчатая форма напряжения

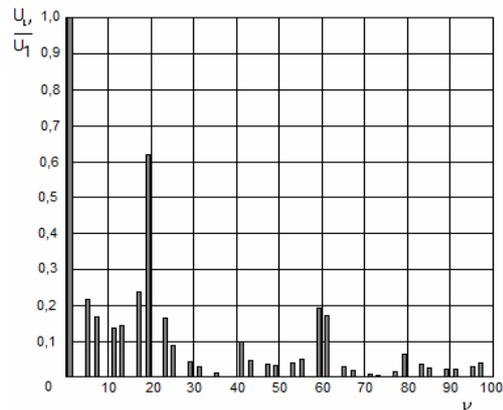


Рис. 2. Спектр гармоник при постоянной ширине импульсов

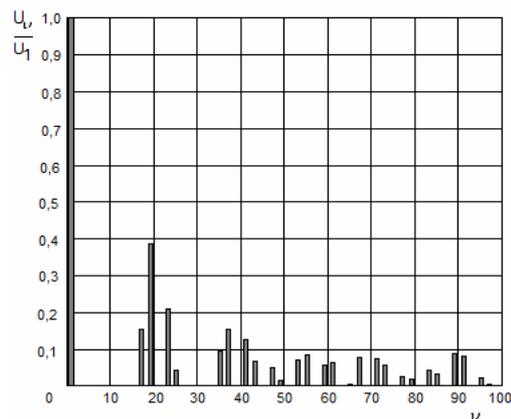


Рис. 3. Спектр гармоник при синусоидальной ширине импульсов

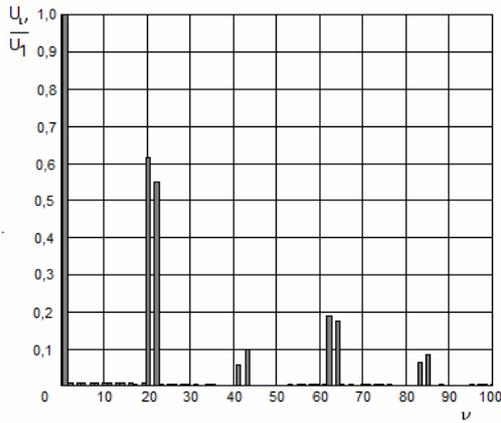


Рис. 4. Спектр гармоник при синусоидальной высоте импульсов

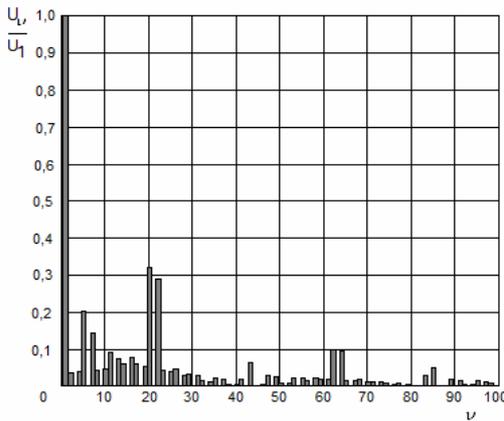


Рис. 5. Спектр гармоник при импульсно-ступенчатой высоте импульсов

Для оценки корректности принятых допущений о пропорциональности активных и индуктивных сопротивлений обмоток частоте и получения более точных частотных зависимостей параметров АД целесообразно использовать системы конечно-элементного моделирования электромагнитного поля. По результатам численных расчетов полей пазового рассеяния для разных частот были получены зависимости активных и индуктивных сопротивлений обмоток от частоты (рис. 6, 7).



Рис. 6. Зависимости активного (1) и индуктивного (2) сопротивлений приведенной обмотки ротора от частоты

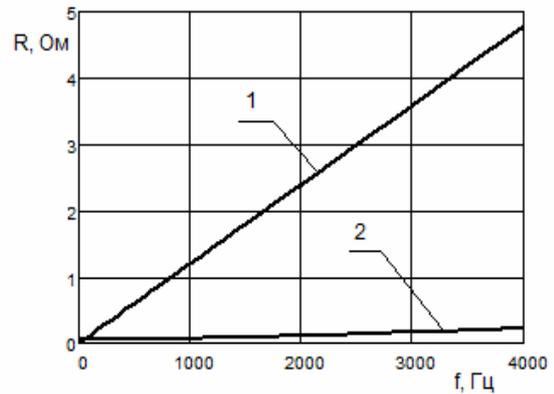


Рис. 7. Активное сопротивление обмотки ротора в предположении прямой пропорциональности частоте (1) и рассчитанное численно (2)

Увеличение активного сопротивления обусловливается действием эффекта вытеснения тока. Индуктивность рассеяния ротора несколько падает, что обусловливает с ростом частоты нелинейное изменение индуктивного сопротивления. Активное сопротивление обмотки статора увеличивается незначительно, поэтому предположение о его прямой пропорциональности частоте является довольно грубым. С достаточной точностью активное сопротивление обмотки статора можно принять постоянным и не зависящим от частоты, а ее индуктивное сопротивление прямо пропорциональным частоте.

Уточненный коэффициент увеличения электрических потерь в этом случае рассчитывается как

$$K_{эл.уточ} = \frac{P_{эл.ном} + \sum_{v=5}^{\infty} \frac{3 \cdot U_v^2 \cdot (r_{1v} + r'_{2v})}{2 \cdot ((r_{1v} + r'_{2v})^2 + (x_{1v} + x'_{2v})^2)}}{P_{эл.ном}}$$

где $r_{1v} = r_1$; $x_{1v} = v \cdot x_1$; r'_{2v} , x'_{2v} – определяются по зависимостям на рис. 6, учитывая, что $f_v = f \cdot v$.

Более совершенный расчет увеличения потерь в АД при питании от ПЧ с ШИМ проведен с использованием численного анализа электромагнитных процессов всего двигателя с учетом насыщения стали и эффекта вытеснения тока в стержнях ротора. Для этого разработана конечно-элементная модель электромагнитного поля АД в плоскопараллельной постановке (рис. 8). Сопротивления лобовых частей обмоток учитываются из присоединенной цепной модели с сосредоточенными параметрами. Уравнения электромагнитного поля решаются совместно с дифференциальными уравнениями внешней цепи.

Электрические потери в пазовой части обмотки определяются как

$$P_{эл.паз} = \frac{h}{\gamma} \cdot \int_S J^2 dS,$$

где γ – электропроводность материала обмотки; J – плотность тока; S – область, занятая обмоткой; h – глубина модели.

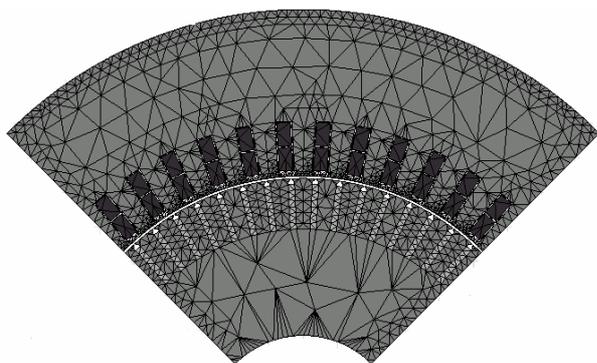


Рис. 8. Конечно-элементная модель полюсного деления АД

Потери в лобовых частях определяются как $P_{эл.лоб} = mI^2 R_{лоб}$, где m – число фаз обмотки; I – действующее значение тока в фазе; $R_{лоб}$ – сопротивление лобовых частей фазы обмотки.

Полные электрические потери в обмотке определяются суммированием потерь в пазовой и лобовой частях.

В результате проведенного численного расчета электромагнитного поля для четырех форм импульсного напряжения (рис. 1) были получены зависимости мгновенных значений токов в фазах обмотки статора при различных формах импульсного напряжения (рис. 9–12).

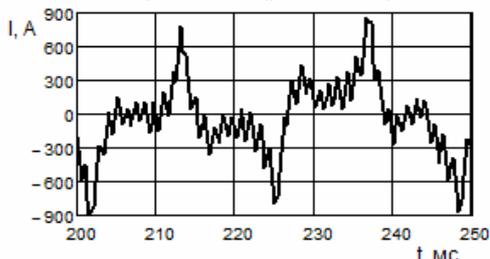


Рис. 9. Ток в фазе обмотки статора при питании импульсами напряжения постоянной ширины

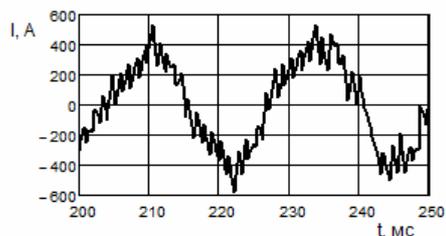


Рис. 10. Ток в фазе обмотки статора при питании импульсами напряжения с синусоидально изменяющейся шириной

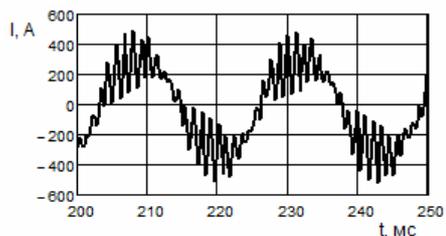


Рис. 11. Ток в фазе обмотки статора при питании импульсами напряжения с синусоидально изменяющейся высотой

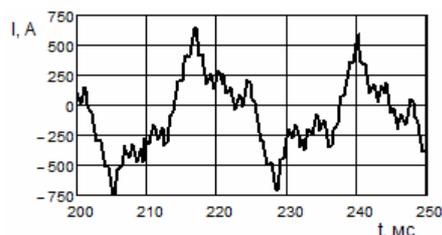


Рис. 12. Ток в фазе обмотки статора при питании импульсно-ступенчатой формой напряжения

По результатам численного расчета определены средние значения суммарных электрических потерь и потерь в стали, на основе которых рассчитаны коэффициенты увеличения потерь ($K_{чис}$). Результаты расчета коэффициентов увеличения потерь и КПД сведены в таблицу.

Значения коэффициентов суммарного увеличения потерь, полученных численно, отличаются от аналитических не более чем на 14,5 % (при питании импульсами с синусоидально изменяющейся высотой). Наименьшее расхождение аналитического и численного расчетов имеет место при питании импульсами с синусоидально изменяющейся шириной и составляет 1,1 %. Следует отметить, что при расчете $K_{сумм.чис}$ использовались значения $P_{эл.ном}$, $P_{ст.ном}$, $P_{сумм.ном}$, полученные из численного расчета потерь в АД при синусоидальном питании. При определении $K_{сумм}$ и $K_{сумм.уточ}$ использовались значения указанных потерь из проектного расчета двигателя.

Коэффициенты увеличения потерь в АД и его КПД при параметрах ШИМ $N = 10$, $\gamma = 0,542$

Форма импульсов	Постоянная ширина	Синусоидальная ширина	Синусоидальная высота	Импульсно-ступенчатая высота
$K_{эл}$	3,106	1,660	2,685	2,132
$K_{эл.уточ}$	1,892	1,266	1,663	1,497
$K_{эл.чис}$	1,934	1,261	1,446	1,830
$K_{ст}$	1,237	1,087	1,218	1,120
$K_{ст.уточ}$	1,237	1,087	1,218	1,120
$K_{ст.чис}$	1,570	1,061	1,145	0,861
$K_{сум}$	2,808	1,569	2,451	1,971
$K_{сум.уточ}$	1,787	1,237	1,592	1,437
$K_{сум.чис}$	1,867	1,224	1,391	1,652
η	0,818	0,885	0,836	0,862
$\eta_{уточ}$	0,873	0,905	0,884	0,893
$\eta_{чис}$	0,873	0,909	0,899	0,884

Заключение

Суммарное увеличение потерь в АД при питании импульсами постоянной ширины с параметрами $N = 10$ и $\gamma = 0,542$ может достигать 86,7 %.

Аналитические соотношения дают погрешность определения дополнительных потерь в АД при питании от ПЧ с ШИМ не более 14,5 %, по сравнению с уточненными расчетами на основе численного моделирования электромагнитных процессов в АД.

Работа выполнена в соответствии с договором с ОАО «НИПТИЭМ».

Список литературы

1. 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.: Изд. центр «Академия», 2004. – 256 с.

2. Казаков Ю.Б., Андреев В.А., Сухинин В.П. Энергоэффективность асинхронных двигателей при вариациях режимных и конструктивных параметров / под общ. ред. Ю.Б. Казакова / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – 132 с.

3. Казаков Ю.Б., Швецов Н.К. Влияние способов и параметров широтно-импульсного модулирования напряжения на дополнительные потери в асинхронном двигателе // Тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу «АЭП-2012» / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – С. 117–120.

References

1. Braslavskiy, I.Ya., Ishmatov, Z.Sh., Polyakov, V.N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy-Efficient Asynchronous Electric Drive]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 256 p.

2. Kazakov, Yu.B., Andreev, V.A., Sukhinin, V.P. *Energoeffektivnost' asinkhronnykh dvigateley pri variatsiyakh rezhimnykh i konstruktivnykh parametrov* [Energy Efficiency of Asynchronous Motors in Variations of Mode and Structural Parameters]. Ivanovo, 2012. 132 p.

3. Kazakov, Yu.B., Shvetsov, N.K. *Vliyanie sposobov i parametrov shirotno-impul'snogo modulirovaniya napryazheniya na dopolnitel'nye poteri v asinkhronnom dvigatele* [The Ways and Parameters Influence of Pulse Width Voltage Modulation on Additional Losses in Asynchronous Motor]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu «AEP-2012»*. Ivanovo, 2012, pp. 117–120.

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, заведующий кафедрой электромеханики,
телефон (4932)26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Швецов Николай Константинович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант, инженер кафедры электромеханики,
e-mail: shvetsov37@gmail.com