

2. Romaniuk, F. A. Dataware of Microprocessor Relay Protection of Electric Installations: Manual / F. A. Romaniuk. – Minsk: Tekhnoprint, 2001. – 133 p.

3. Romaniuk, F. A. Principles of Fulfillment of Flexible Formers of Orthogonal Input Value Components in Micro-Processing Protection of Power Plants / F. A. Romaniuk, V. Yu. Rumjansev, K. F. Romaniuk // Energetika – Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. – 2012. – No 6. – P. 5–10.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 02.12.2013

УДК 621.34

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ШИМ-УПРАВЛЕНИЕМ

Канд. техн. наук, доц. БЕЛЯЕВ В. П.

Белорусский государственный технологический университет

E-mail: bksisa@rambler.ru

A.C. ELECTRIC DRIVE WITH PULSE-WIDTH MODULATION CONTROL

BELYAEV V. P.

Belarusian National Technical University

Предложен оригинальный способ широтно-импульсной модуляции напряжения переменного тока. Способ улучшает гармонический состав напряжения. Приведены результаты апробации способа ШИМ-управления асинхронным электроприводом на разработанной модели в среде MathCad.

Ключевые слова: электропривод, широтно-импульсная модуляция, переменный ток.

Ил. 7. Библиогр.: 4 назв.

The paper proposes an original method for pulse-width modulation (PWM) of A.C. voltage. The method makes it possible to improve harmonic composition of the voltage. The paper presents results of approbation of the method for PWM-control of an asynchronous electric drive using the developed model in the environment of MathCad.

Keywords: electric drive, pulse-width modulation, a.c. current.

Fig. 7. Ref.: 4 titles.

В силу технико-экономических причин современные электроприводы в большинстве своем создаются на базе асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, который проще по конструкции, дешевле, имеет меньшие капитальные и эксплуатационные затраты. Успехи технологии полупроводниковой силовой техники позволили создать модульные полупроводниковые преобразователи на значительные мощности, реализующие разнообразные теоретические разработки регулируемого электропривода переменного тока. Основным способом получения качественных пусковых, регулировочных и тормозных свойств регулируемого электропривода переменного тока, сопоставимых с аналогичными свойствами регулируемого

электропривода постоянного тока, является частотный способ управления, позволяющий получить высококачественное регулирование, различные функциональные свойства асинхронного электропривода. Однако это сопровождается достаточно сложными системами управления с использованием интеллектуальных полупроводниковых преобразователей. Параметрический способ управления асинхронным электроприводом имеет определенные ограничения по диапазону получения регулировочных характеристик, расширение которого приводит к увеличению габаритной мощности электродвигателя и, как правило, к недоиспользованию этой мощности. Но в вопросах организации процессов пуска он является альтернативным частотному управлению, что подтверждается промышленным выпуском устройств плавного пуска [1]. В построении регулируемого электропривода переменного тока имеется особенность, состоящая в том, что его управление выполняется по одному каналу по обмоткам статора двигателя, а также существует сложность в измерении ряда координат электропривода.

Одним из возможных способов регулирования координат асинхронного двигателя является изменение напряжения на обмотках статора. Для реализации такого способа регулирования между питающей сетью и обмотками статора включается регулятор напряжения. В качестве него могут выступать электромагнитный преобразователь, электростатический аппарат – автотрансформатор, фазорегулятор, индукционный регулятор, полупроводниковый преобразователь: транзисторный, тиристорный, симисторный.

Механическая характеристика $M = f(\delta)$ асинхронного двигателя на основе теории обобщенной машины описывается следующим выражением, из которого видна зависимость момента двигателя от напряжения питания [2]:

$$M_s = \frac{3}{2} \frac{|\bar{u}_s|^2 a_{12} a_{21} \delta}{R_s [a_{11}^2 + \omega_s^2 \delta_k^2 + \delta^2 + 2a_{12} a_{21} \omega_s \delta]},$$

где $|\bar{u}_s|$ – модуль вектора фазного напряжения, питающего обмотки статора; R_s – активное сопротивление обмотки фазы статора; ω_s – частота вращения магнитного поля статора; $\delta = \omega_s - \omega_r$ – параметр абсолютного скольжения; ω_r – частота вращения ротора; δ_k – критическое значение параметра абсолютного скольжения; a_{11} , a_{12} , a_{21} – коэффициенты, составленные из параметров эквивалентной схемы электродвигателя переменного тока.

Анализ качества механических характеристик при параметрическом регулировании по регулировочным, пусковым и перегрузочным свойствам позволяет сделать следующие выводы:

- с уменьшением напряжения уменьшаются значения пускового и максимального значений момента двигателя;
- реализуется небольшой диапазон регулирования скорости;
- уменьшается модуль жесткости статических характеристик, что способствует ухудшению точности регулирования.

Параметрическое регулирование скорости наиболее приемлемо для механизмов с вентиляторной механической характеристикой $M_{ст} = f(\omega^2)$.

В подавляющем большинстве случаев изменение напряжения на обмотках статора асинхронного двигателя выполняется полупроводниковыми регуляторами напряжения, которые реализуют фазовый способ управления $u(t) = U_{\max} \sin \alpha$ (параметрическое управление, рис. 1а).

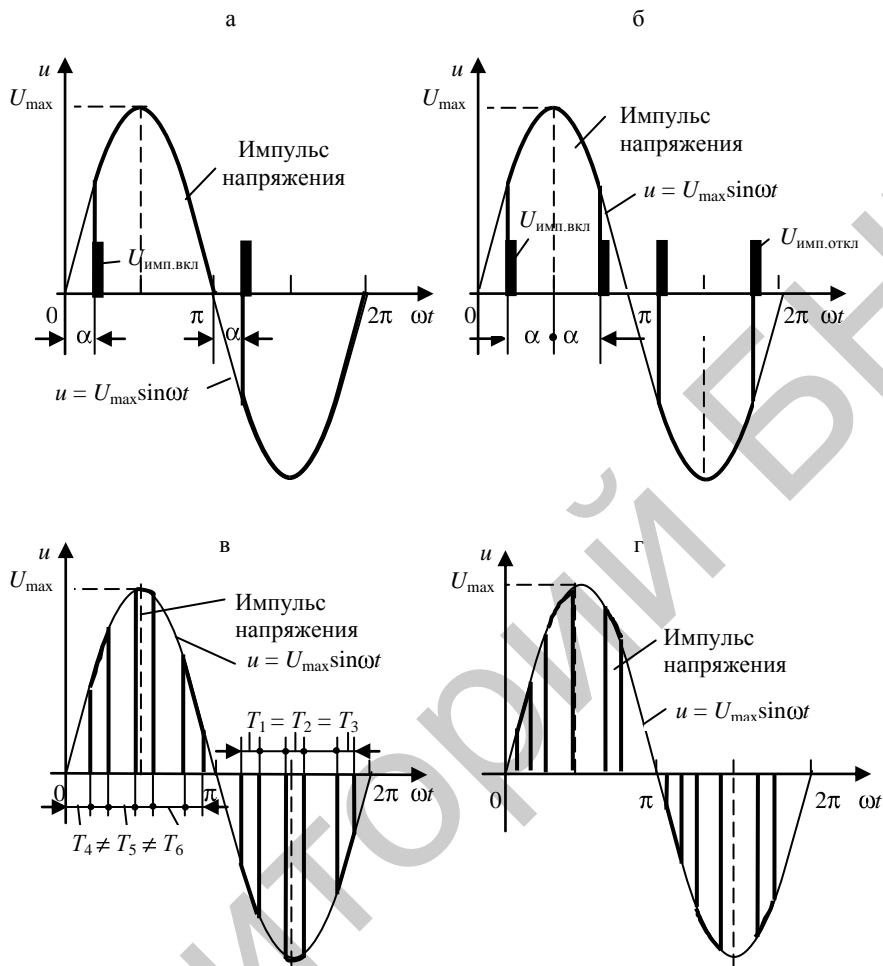


Рис. 1. Эпюры формирования регулируемого напряжения

Особенность такого применения состоит в том, что в результате преобразования входного в регулятор напряжения на обмотки статора подается выходное несинусоидальное напряжение, качественный гармонический состав которого ухудшается с увеличением угла управления α . Известно, что в этом случае высшие гармонические составляющие:

- во-первых, осуществляют дополнительный нагрев двигателя;
- во-вторых, гармонические составляющие тока с номерами $3k + 1$ и $3k - 1$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) создают в воздушном зазоре двигателя соответственно прямо и обратно вращающиеся поля и электромагнитные моменты, в результате чего образуются колебания результирующего момента на валу двигателя и, как следствие, его скорости;
- в-третьих, гармонические составляющие тока с номерами $3k$ образуют пульсирующие поля, не участвующие в создании пускового момента дви-

гателя, а, следовательно, еще больше уменьшают значение пускового момента, ослабляя динамику пуска [3].

Но формирование регулируемого напряжения на обмотках статора может быть выполнено не столь простым способом. Возможны следующие приемы его формирования, а именно:

- из одного импульса, симметрично расположенного относительно центра полусинусоиды (рис. 1б);
- из нескольких импульсов одинаковой ширины, произвольно расположенных на полупериоде (рис. 1в);
- из нескольких импульсов разной ширины, произвольно расположенных на полупериоде (рис. 1г);
- из нескольких импульсов одинаковой ширины, расположенных на полупериоде определенным образом (рис. 2).

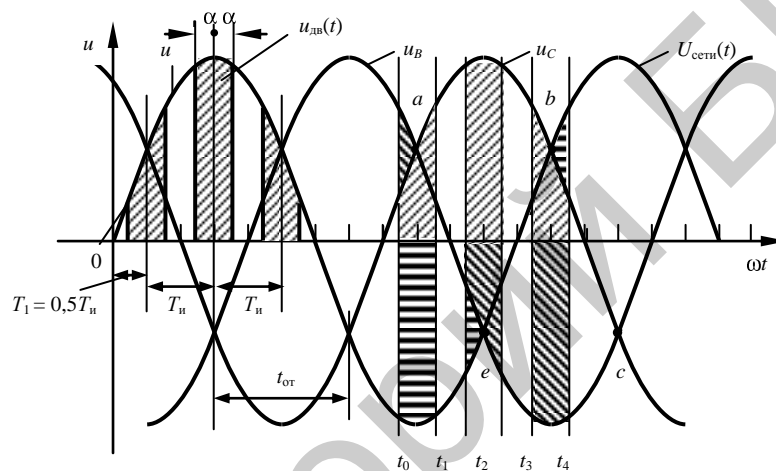


Рис. 2. Эпюры формирования ШИМ-напряжения: u_A, u_B, u_C – система трехфазного напряжения питающей сети; a, b, c – точки естественного пересечения полупериодов напряжений; $u_{дв.A}(t)$ – импульс ШИМ-напряжения фазы А, подающийся на обмотку статора двигателя; $U_{сети}(t)$ – напряжение питающей сети; α – угол регулирования; T_1 – расстояние до центра первого пульса; T_n – расстояние между пульсами; $t_{от}$ – отрезок времени, на котором формируется ШИМ-напряжение

В задачу каждого из этих вариантов входит уменьшение высших гармонических составляющих в питающем обмотку двигателя напряжении.

Эпюры напряжения при данном широтно-импульсном формировании приведены на рис. 2.

Рассмотрим последний вариант и одну из его интерпретаций, а именно формирование напряжения на каждом полупериоде из импульсов, центры которых отстоят друг от друга на расстояние π/m , где $m = 3, 6, 9, 12, \dots$ – целое число импульсов в полупериоде. Центр первого импульса располагается в точке $\pi/2m$ от начала полупериода, положение фронтов каждого импульса изменяется в ту и другую сторону от центра импульса (рис. 2) [4]. Кроме того, количество импульсов на каждом полупериоде трехфазной системы напряжения выбирается из соотношения $n = 2mk \pm 1$, где $k = 1, 2, 3, 4, \dots$, а n – номер выбранной гармоники, которая должна присутствовать в промодулированном напряжении.

Если в напряжении допускаются 5, 7, 11, 13 и т. д. гармоник, то число пульсов на полупериоде $m = 3$, если 11, 13, 23, 25, то $m = 6$. Следовательно,

рассматриваемый способ широтно-импульсной модуляции переменного напряжения осуществляет подавление определенных гармоник, чем улучшает гармонический состав питающего напряжения и тем самым энергетические показатели, а также позволяет сформировать симметричную трехфазную систему как для фазных, так и для линейных напряжений. Другие способы не позволяют получить симметричную трехфазную систему напряжений. Угол регулирования α может изменяться по любому закону: линейному, пропорциональному, прямоугольному, синусоидальному и т. п. Поскольку гармонический состав питающего асинхронный двигатель напряжения определяет форму механических характеристик, а, следовательно, его регулировочные свойства и энергетические показатели, оценим предлагаемый способ методами математического анализа. Анализируемая функция (рис. 2) носит несинусоидальный характер, является нечетной, периодической (с периодом 2π) и определена на этом интервале следующим способом:

$$f(\omega t) = \begin{cases} 0; & \omega t \subseteq \sum_{i=1}^n A - \alpha; \quad U \sum_{i=1}^n A + \alpha \quad A - \alpha; \\ \sin \omega t; & \omega t \subseteq \sum_{i=1}^n A - \alpha; \quad A + \alpha, \end{cases}$$

где $A = \frac{\pi}{2m}n$, $n = m$, n – число нечетных членов натурального ряда чисел.

В силу своей нечетности рассматриваемая функция при разложении в ряд Фурье будет иметь коэффициенты a_0 и a_n , равные нулю. Коэффициенты типа b_n функции, отражающей напряжение питания двигателя, выражаются так:

$$U_k = \sum_{i=1}^k \int_{A-\alpha}^{A+\alpha} \sin \omega t \sin n \omega t dt = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} \left(\frac{\sin n-1 \omega t}{n-1} \Big|_{A-\alpha}^{A+\alpha} - \frac{\sin n+1 \omega t}{n+1} \Big|_{A-\alpha}^{A+\alpha} \right)$$

где k – номер гармоники, значение которой исследуется.

Гармонический анализ рассматриваемого ШИМ-напряжения при $m = 3, 6, 9$ был выполнен численным методом в пакете программ MathCad. Результаты этого гармонического анализа, где в качестве примера приведены изменения значений первой и десяти первых высших гармонических составляющих при различном количестве импульсов на полупериоде выходного напряжения, а именно при $m = 3, 6$ и 9 , представлены на рис. 3.

Эти зависимости показывают, что амплитуды напряжений высших гармонических составляющих неизменны для порядкового номера их последовательности вне зависимости от числа пульсов напряжения. Известно, что полное сопротивление электрических и магнитных контуров двигателя для каждой гармоники возрастает в соответствии с ее номером. Это приводит к малым значениям тока в обмотках двигателя, а следовательно, и к малым электромагнитным моментам, которые создаются высшими гармоническими составляющими ШИМ-напряжения. А уменьшение токов снижает уровень греющих потерь в активной составляющей общих потерь

двигателя, что позволяет выполнить определенное расширение диапазона регулирования скорости двигателя, создает условия энергосбережения в установившихся и переходных режимах.

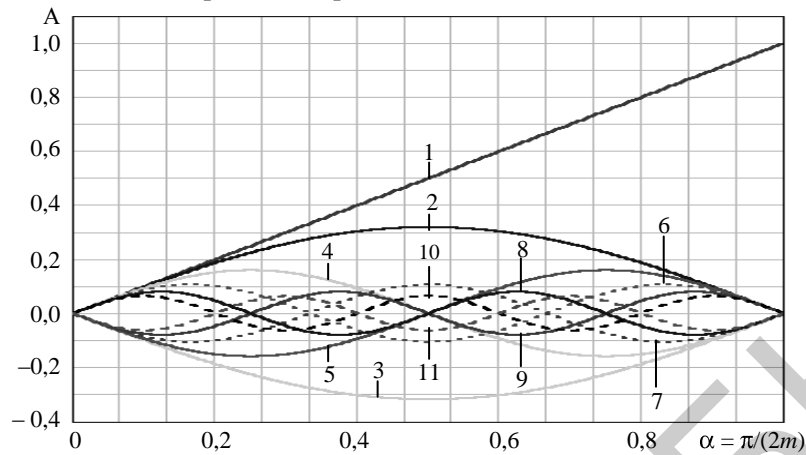


Рис. 3. Зависимости амплитуд гармоник напряжения от угла управления α .

$A = U_i/U_{\text{ном}}$ — относительная амплитуда i -й гармоники; m — число пульсов напряжения на его полупериоде; 1 — амплитуда первой гармоники при любых m ;
 при $m = 3$: 2 — 5-я гармоника; 3 — 7-я; 4 — 11-я; 5 — 13-я; 6 — 17-я; 7 — 19-я; 8 — 23-я; 9 — 25-я; 10 — 29-я, 11 — 31-я гармоника;
 при $m = 6$: 2 — 11-я гармоника; 3 — 13-я; 4 — 25-я; 5 — 23-я; 6 — 35-я; 7 — 37-я; 8 — 49-я; 9 — 47-я; 10 — 59-я; 11 — 61-я гармоника;
 при $m = 9$: 2 — 19-я гармоника; 3 — 17-я; 4 — 35-я; 5 — 37-я; 6 — 55-я; 7 — 53-я; 8 — 71-я; 9 — 73-я; 10 — 91-я; 11 — 89-я гармоника

Апробацию рассмотренного ШИМ-управления отрабатывали организацией процесса пуска электропривода производственного механизма (печатная машина марки «Доминант»), приведенный момент инерции которого в четыре раза превышает момент инерции приводного двигателя мощностью 2,2 кВт. Исследование пуска проводили в вычислительной среде MathCad при формировании выходного напряжения регулятора из трех пульсов на каждом его полупериоде. Ширину этих пульсов, а значит, угол управления ШИМ-напряжения, изменяли по прямолинейному закону как наиболее простому в технической реализации. Исследовали потери мощности, характер изменения электромагнитного момента электродвигателя, его скорости при пуске печатной машины, имеющей при этом статический момент сопротивления холостого хода машины. Исследования проводили на математической модели, описывающей поведение асинхронного электропривода, составленной на основании теории обобщенной машины как наиболее разработанной и рациональной для описания различных режимов работы электроприводов переменного тока [2].

Для трогания печатной машины необходимо, чтобы при включении приводного электродвигателя он создал на своем валу механический момент, равный моменту статического сопротивления машины на холостом ходу. Значение напряжения, соответствующее этому состоянию, вычисляется по выражению

$$|\bar{u}_s| = \sqrt{\frac{2M_{x.x}R_s \left[a_{11}^2 + \omega_s^2 \delta_k^2 + \omega_s^2 + 2a_{12}a_{21}\omega_s^2 \right]}{3a_{12}a_{21}\omega_s}},$$

где $M_{x.x}$ — момент холостого хода машины.

Это значение напряжения можно сразу подавать на обмотки статора двигателя, а можно с помощью регулятора напряжения увеличивать до указанного значения. При этом момент, развиваемый двигателем, достигает момента холостого хода механизма за доли секунды, что определяет время запаздывания пуска ($t_{\text{зап}}$). Затем начинается трогание вала и увеличение его скорости, определяемое интенсивностью возрастания напряжения как управляющего воздействия (нарастания первой гармонической составляющей $U_1 = f(\alpha)$). Характеристическая точка, показывающая развитие скорости в плоскости механической характеристики, в начале разгона находится в зоне скольжений $1 > s > s_{\text{кр}}$, что оценивается как «жесткий» пуск, сопровождающийся значительными потерями мощности, а после достижения $s_{\text{кр}}$ характеристическая точка переходит в зону скольжений $0 < s < s_{\text{кр}}$, что оценивается как «мягкий» пуск, сопровождающийся потерями мощности, сопоставимыми с номинальными потерями. В конце разгона характеристическая точка стремится к точке равновесия $M_{\text{дв}} = M_{\text{х.х}}$. Интенсивность возрастания управляющего воздействия может определяться требованиями со стороны технологической машины, что в основном выливается в получение за время пуска ускорения, не превышающего допустимое для нее значение. Если имеется задача минимизации времени пуска (быстродействие), то интенсивность возрастания управляющего воздействия определяется максимально допустимым ускорением вала двигателя. Приведем некоторые результаты исследования процессов пуска при определенных параметрах электропривода ($M_{\text{х.х}}$, $J_{\Sigma\text{пр}}$) и времени управляемого пуска $t_{\text{упр.п}}$. Зависимости управляющего воздействия (изменение амплитуды прикладываемого к обмоткам статора напряжения) u_s , электромагнитного момента, развиваемого двигателем $M_{\text{эм}}$, частоты вращения ротора ω_r в функции времени приведены (в относительных единицах) на рис. 4. При этом момент холостого хода механизма полагался равным $M_{\text{х.х}} = 0,2M_{\text{ном}}$, а суммарный приведенный момент инерции электропривода составлял $J_{\Sigma\text{пр}} = 4J_{\text{дв}}$.

Процессы отражают три этапа. Первый характеризует запаздывание движения ротора двигателя ($t_{\text{зап}}$), второй показывает развитие электромагнитного момента двигателя, определяемое увеличивающимся значением прикладываемого к двигателю напряжения, и связанное с этим изменение скорости ротора ($t_{\text{упр.п}}$), третий демонстрирует работу двигателя при номинальном значении напряжения питания двигателя (неуправляемый процесс разгона).

В начале разгона ротора наблюдаются высокочастотные колебания электромагнитного момента двигателя, обусловленные влиянием высших гармонических составляющих несинусоидального питающего напряжения. Однако эти колебания из-за инерционности электропривода ($J_{\Sigma\text{пр}}$) существенно искажают характер изменения скорости двигателя. Ускорение ротора постепенно увеличивается и достигает установившегося значения после того, как исчезнут колебания электромагнитного момента. Анализ изменения электромагнитного момента показывает, что он достигает своего максимального значения в момент времени t_s в зоне критического скольжения $s_{\text{кр}}$, когда двигатель переходит от «жесткого» режима работы к «мягкому». Несмотря на увеличивающееся напряжение питания двигателя, значение электромагнитного момента уменьшается в соответствии

с формой его механической характеристики. Скорость продолжает возрастать и достигает того значения, которое достаточно близко соответствует установившемуся режиму работы двигателя с $M_{x,x}$, причем к этому времени значение электромагнитного момента становится равным $M_{x,x}$.

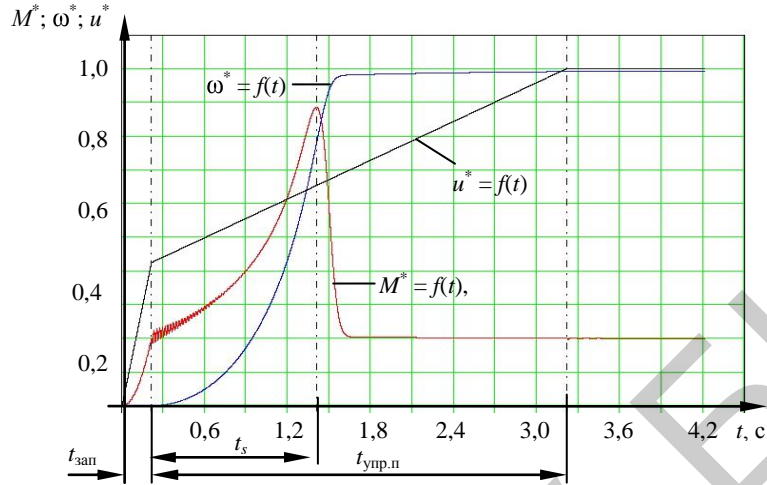


Рис. 4. Зависимости $u^* = f(t)$, $M^* = f(t)$, $\omega^* = f(t)$ при пуске двигателя:
 $u^* = u_s / U_{s \max}$ – относительное значение амплитуды напряжения питания;
 $M^* = M_{эм} / M_{ном}$ – относительное значение электромагнитного момента;
 $\omega^* = \omega_r / \omega_0$ – относительное значение скорости ротора

С этого момента времени увеличение напряжения питания не оказывает существенного влияния на изменение электромагнитного момента и скорости двигателя. При разном времени управляемого пуска (различной интенсивности увеличения напряжения питания) эта зона составляет 10–40 % $t_{упр.п}$. Чем больше время управляемого пуска, тем больше зона.

Обоснованным является сравнение потерь мощности в двигателе при пусках. На рис. 5 показан характер изменения потерь мощности при пуске непосредственной подачей напряжения питания на двигатель, при этом относительные потери мощности за время пуска $t_n = 0,28$ с составили $\Delta p^* = 6,92$.

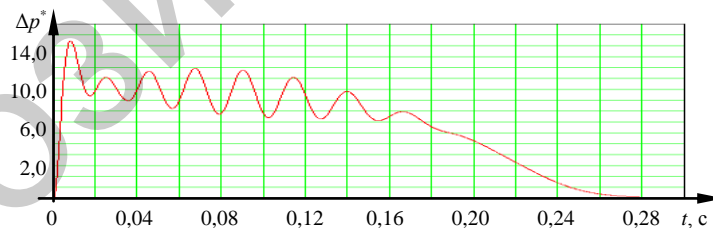


Рис. 5. Характер изменения суммарных потерь мощности в двигателе за время прямого пуска

Характер изменения потерь мощности при пуске изменяющимся синусоидальным напряжением питания показан на рис. 6. При этом относительные потери мощности за время пуска $t_n = 3,28$ с составили $\Delta p^* = 1,138$. Характер изменения потерь мощности при пуске ШИМ-напряжением, способ изменения которого изложен в данной работе, показан на рис. 7. При

этом относительные потери мощности за время пуска $t_{п} = 3,28$ с составили $\Delta p^* = 1,337$.

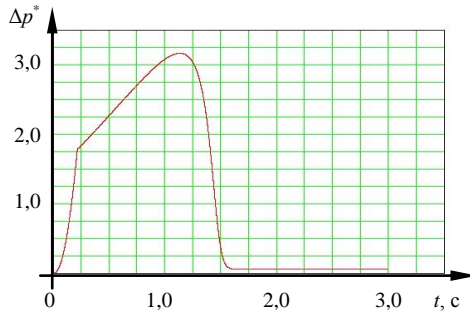


Рис. 6. Характер изменения суммарных потерь мощности в двигателе за время пуска изменением синусоидального напряжения питания

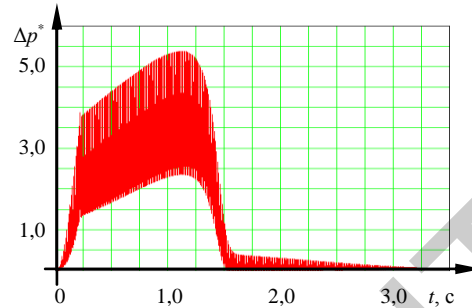


Рис. 7. Характер изменения суммарных потерь мощности в двигателе за время пуска при ШИМ-управлении

Оценивая характер изменения потерь мощности, можно сказать, что при:

- прямом пуске происходит интенсивное выделение греющих потерь мощности, мгновенные значения которых в десятки раз превышают номинальные потери и которые имеют место на протяжении почти всего времени разгона;
- пуске изменяющимся синусоидальным напряжением питания (на практике встречается редко) изменение потерь мощности незначительно превышает номинальные значения, и они имеют место в зоне «жесткого» пуска;
- пуске ШИМ-напряжением изменения мгновенных значений потерь мощности существенны, но имеют место в зоне «жесткого» пуска. Это объясняется влиянием высших гармонических составляющих тока двигателя. Суммарные потери мощности за время пуска не намного превышают значение номинальных потерь, что создает нормальное тепловое состояние двигателя.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы по использованию предложенного ШИМ-управления:

- устраняет в питающем обмотки статора асинхронного двигателя напряжении высшие гармонические составляющие, наиболее негативно влияющие на его электромагнитный момент и скорость;
- линеаризирует выходную характеристику полупроводникового регулятора напряжения по первой энергетической составляющей напряжения (рис. 3);
- получает выигрыш во влиянии потерь мощности на общий нагрев асинхронной машины, что несколько расширяет диапазон регулирования скорости, поскольку на общий нагрев двигателя не влияют устраненные высшие гармонические составляющие тока статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.artesk.ru/softstarter_siemens

2. Б е л я е в, В. П. Электромеханика. Электромеханическое преобразование при частотном управлении электрическими машинами / В. П. Беляев, Л. М. Давидович. – Минск: БГТУ, 2004.

3. Б р а с л а в с к и й, И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И. Я. Браславский. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

4. С п о с о б широтно-импульсной модуляции выходного напряжения переменного тока: а. с. 764096 (СССР) / В. П. Беляев, Г. И. Гульков, В. Г. Сидоров; заявл. в 1979 // Б. И. – 1980. – № 34. – С. 38.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.artesk.ru/softstarter_siemens

2. B e l y a e v, V. P. Electrical Engineering. Electrical Engineering Transformation at Variable Frequency Control of Electric Machinery / V. P. Belyaev, L. M. Davidovich. – Minsk: BGTU, 2004.

3. B r a s l a v s k y, I. Ya. Asynchronous Semiconducting Electric Drive with Parametric Control / I. Ya. Braslavsky. – M.: Energoatomizdat, 1988.

4. M e t h o d for Pulse-Width Modulation of A.C. Output Voltage: Inventor's Certificate 764096 (USSR) / V. P. Belyaev, G. I. Gulkov, V. G. Sidorov; Invention Application in 1979 // В. И. – 1980. – No 34. – P. 38.

Представлена кафедрой
полиграфического оборудования
и систем обработки информации

Поступила 04.03.2013

УДК 621.314

ОБ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЯХ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Канд. техн. наук, доц. ГОНЧАР А. А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: bntu.epp@yandex.ru

ON SPECIFIC LOSSES OF TRANSFORMER POWER GONCHAR A. A.

Belarusian National Technical University

Выполнен поиск зоны оптимальной загрузки трансформатора по минимуму суммарных потерь активной мощности.

Ключевые слова: мощность трансформатора, удельные потери, коэффициент загрузки.

Zone searching for optimum transformer loading according to minimum of total active power losses has been carried out in the paper.

Keywords: transformer power, specific losses, loading factor.