ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА С ШИМ-УПРАВЛЕНИЕМ

ACCIONAMIENTO ELECTRICO DE CORRIENTE DIRECTA CON CONTROL PWM

DC ELECTRIC DRIVE With PWM CONTROL

***PhD. V. P. Belyaev, **PhD. Aldo Pardo Garcia**

*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus
**University of Pamplona, Pamplona, Colombia

E-mail: bksisa@rambler.ru**,** apardo13@unipamplona.edu.co

Реферат: В статье рассматривается запатентованный способ широтно-импульсное формирование выходного напряжения управляемого выпрямителя для регулируемого электропривода. Он направлен на уменьшение высших гармонических составляющих питающего напряжения, что уменьшает пульсации электромагнитного момента и скорости. Гармонический анализ ШИМ-напряжения показывает, что выходная характеристика выпрямителя – $U_{вых} = f(\alpha_{упр})$ линейна. Применение ШИМ-напряжения создаёт более качественные регулировочные характеристики электропривода по сравнению с традиционным фазовым управлением. Расчёты режимов проведены в среде *Mathcad*. Приводится пример расчётов в виде зависимостей электромагнитного момента $M^*_{дв} = f(t)$ и угловой скорости электродвигателя $\omega^*_{дв} = f(t)$.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, ШИМ-напряжение, моделирование.

Resumen: El artículo trata del método patentado de generación de ancho de pulso de la tensión de salida de un rectificador controlado para un accionamiento eléctrico regulado. Está dirigido a reducir los componentes armónicos más altos de la tensión de alimentación, lo que reduce las pulsaciones del momento y la velocidad. El análisis de los armónicos de tensión PWM muestra que la característica de salida del rectificador - Uout = f (αcontr) es lineal. El uso de la PWM de tensión mejora las características de control del variador en comparación con el control por fase tradicional. Los modos se calcularon con el software de Mathcad. Se da un ejemplo de cálculos en forma de las dependencias del momento electromagnético M*mot = f(t) y la velocidad angular del motor eléctrico.

Palabras claves: accionamiento eléctrico de CC, voltaje PWM, modulación.

Abctract: The article deals with the patented method of pulse width generation of the output voltage of a controlled rectifier for a regulated electric drive. It is aimed at reducing the higher harmonic components of the supply voltage, which reduces the pulsations of the electromagnetic moment and speed. Harmonic analysis of the PWM voltage shows that the output characteristic of the rectifier - Uout = f (αupr) is linear. The use of PWM voltage generates better control characteristics of the drive in comparison with traditional phase control. The modes were calculated in the Mathcad environment. An example of calculations in the form of the dependences of the electromagnetic moment Uout = f (αcontr) and the angular velocity of the electric motor M*mot = f(t) is given.

Key words: DC electric drive, PWM voltage, modelation.

1. ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы любой отрасли производства требуют в определенном смысле регулирования, что выполняется применением источников регулируемой механической энергии в технологической машине. Основным источником механической энергии при этом является автоматизированный электропривод постоянного или переменного тока. Режимы электродвигателя как основы электроприводов должны реализовать алгоритмы работы технологической машины. Она характеризуется скоростной и нагрузочной диаграммами движения всех её узлов и механизмов, что должно с определенной точностью выполняться электроприводом, соответствующим по своим энергетическим показателям, способам и методам управления технологией. Таким образом, на индивидуальный электропривод возлагаются две взаимосвязанные функции:
– электромеханическое преобразование энергии
– управление технологическим процессом.
Технологические процессы производственных установок определяют необходимость регулирования некоторых координат электропривода. Для этого необходимо сформировать ряд механических характеристик электропривода. Это возможно выполнить различными способами.
Если рассматривать регулируемый электропривод типа «управляемый выпрямитель–двигатель постоянного тока независимого возбуждения», то формирование механических характеристик в большинстве случаев достигается изменением напряжения на выходе управляемого выпрямителя традиционным фазовым способом.
Выходное напряжение регулируемых выпрямителей обладает высшими гармоническими составляющими, которые при работе выпрямителей на двигатель вызывают высшие гармонические составляющие тока, неблагоприятно влияющие на его режимы:
– создают пульсации электромагнитного момента электродвигателя и его скорости;
– увеличивают действующее значение тока якоря, что приводит к возрастанию тепловых потерь;
– создают пульсации поперечного поля якоря, что повышает потери на перемагничивание железа двигателя и усиливают шум при его вращении;
– ухудшают коммутацию обмоток якоря двигателя;
– при широком диапазоне регулирования напряжения, обеспечивающим глубокое регулировании скорости ($D \geq 10\ 000$), выпрямитель имеет низкий коэффициент мощности.

2. РЕКОМЕНДАЦИИ

Для уменьшения этих явлений используется установка сглаживающих реакторов в цепи якоря или другие методы организации управления выпрямителем. Одним из методов такого управления можно назвать модуляционное формирование выходного напряжения выпрямителя. При известных способах модуляции в регулируемом электроприводе наибольшее применение получила широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая приводит к повышению коэффициента мощности ($\cos\varphi$) выпрямителя, линеаризации его выходной характеристики, расширению функциональных возможностей, улучшению гармонического состава выходного напряжения выпрямителем, т. е. к уменьшению его коэффициента гармоник.

В современной научно-технической литературе рассматривается достаточное количество различных способов широтно-импульсной модуляции выходного напряжения выпрямителя. Отличительной особенностью их является отсутствие точного места расположения центров импульсов формируемого напряжения относительно точек естественного перехода входного в выпрямитель синусоидального напряжения через нуль или относительно точек естественного пересечения этих синусоидальных напряжений, а в некоторых случаях возникает различная ширина импульсов, из которых формируется выходное напряжение.

3. ОСНОВНА ЧАСЬ

Оригинальный способ получения регулируемого ШИМ-напряжения постоянного тока на выходе управляемого однофазного или трехфазного полупроводникового выпрямителя изложен в [1], (рис. 1). Сущность способа состоит в фиксация точного места расположения центров импульсов формируемого выпрямленного напряжения относительно точек естественного перехода синусоильного напряжения через нуль или относительно точек естественного пересечения синусоидальных напряжений питающей однофазной или трёхфазной сети, а также в регулировании выпрямленного напряжения путём изменения ширины импульсов относительно их центров равномерно в обе стороны по любому закону.

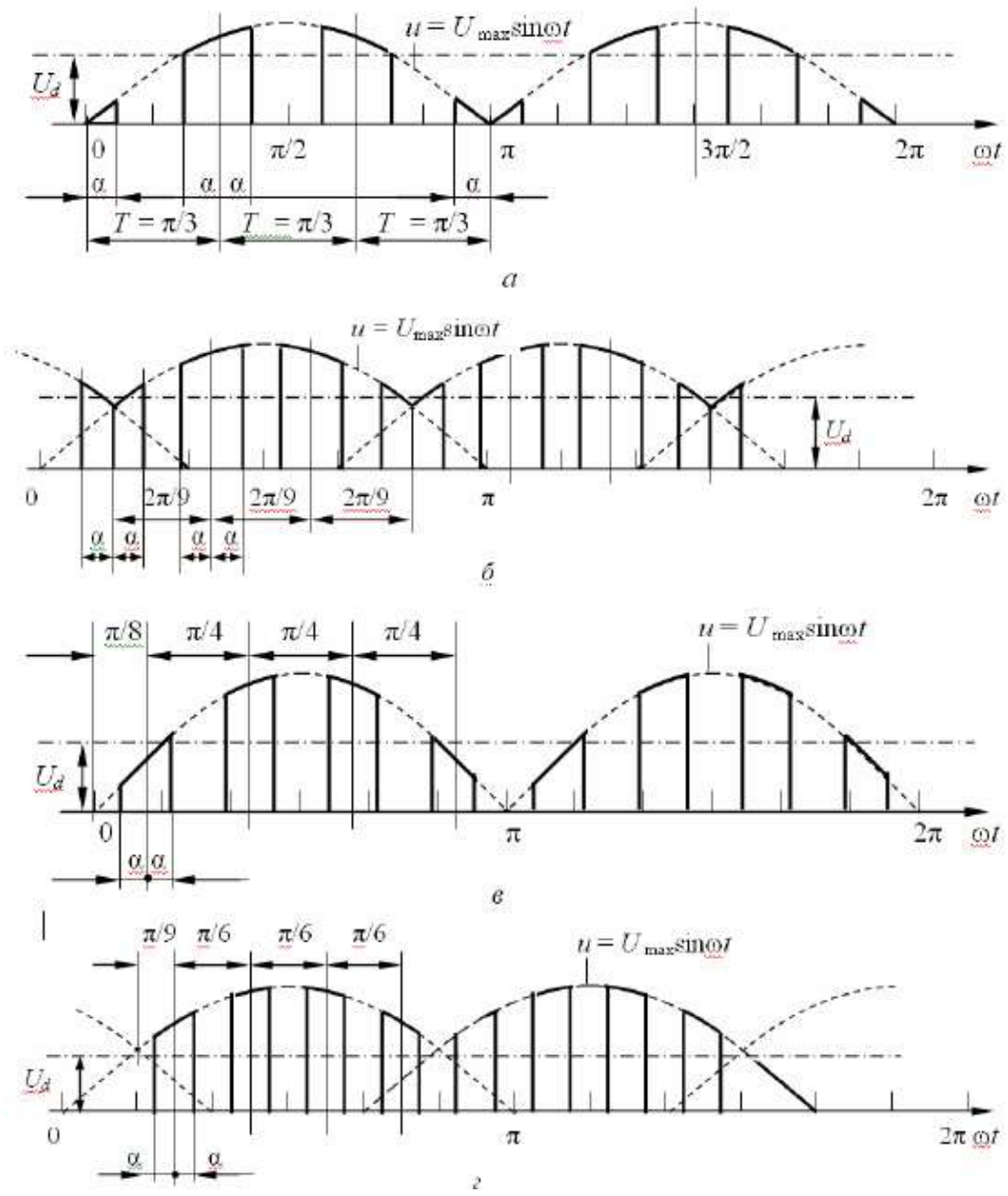


Рис. 1. Эпюры регулируемого выпрямленного напряжения:
по первому способу: а – из однофазного переменного напряжения при m = 4
б – из трёхфазного переменного напряжения при m = 4;
по второму способу: в – из однофазного переменного напряжения при m = 4
г – из трёхфазного переменного напряжения при m = 4;
U_d – средневыпрямленное напряжение;
α – угол управления шириной импульса напряжением

Поставленная задача решается тем, что способ получения регулируемого напряжения постоянного тока состоит в формировании его из импульсов напряжения, регулируемых по ширине и взятых как из положительных, так и из отрицательных полупериодов нерегулируемого однофазного или трёхфазного переменного синусоидального напряжения.

Формирование регулируемого напряжения постоянного тока выполняется из количества импульсов, равного *m*, где *m* = 2, 3, 4…. Предлагаемый способ направлен на уменьшение пульсаций тока электродвигателя, питающегося этим напряжением, а значит и пульсаций электромагнитного момента электродвигателя и его скорости.

Применение указанного способа:
– линеаризирует выходную характеристику выпрямителя – $U_{вых} = f(\alpha_{упр})$,
– уменьшает характер влияния высших гармонических составляющих напряжения на выходное напряжение выпрямителя,
– упрощает техническую реализацию системы управления выпрямителем в части линеаризации выходной характеристики, получает более качественные регулировочные характеристики электропривода по сравнению с традиционным фазовым управлением.
Целесообразно обратить внимание на то, что формирование ШИМ-напряжения выполнять двумя способами. Первый способ формирует импульсы регулируемого выпрямленного напряжения так, что половина первого импульса, созданного на полупериоде, начинается в точке естественного перехода синусоидального напряжения через нуль, а последующие формируются в соответствии с алгоритмом, предлагаемым [1] (рис. 1, *а*, *б*).
Выходное напряжение как анализируемая функция носит несинусоидальный характер и определена на этом интервале следующим выражением:

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

где $A = \pi n/2m$, $n = m$, n – число нечётных членов натурального ряда чисел. В силу своей нечётности рассматриваемая функция при разложении в ряд Фурье будет иметь коэффициенты a_0 и a_n, равными нулю. Коэффициенты функции типа b_n, отражающей напряжение питания двигателя, могут быть представлены так:

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

где k – номер гармоники, значение которой исследуется.

Был проведен анализ гармонического состава рассматриваемых напряжений в среде *Mathcad* путём разложения их в ряды Фурье. Результатом анализа является характер изменения амплитуд основной гармоники и высших гармонических составляющих, приведённый на рис. 2. Здесь *1* – при фазовом управлении выпрямителем при однофазном напряжении; *2* – при фазовом управлении выпрямителем при трёхфазном напряжении; *3* – при двух импульсах на полупериоде при однофазном напряжении; *4* – при двух импульсах на полупериоде при трёхфазном напряжении; *5* – при трёх импульсах на полупериоде при однофазном напряжении; *6* – при трёх импульсах на полупериоде при трёхфазном напряжении; *7* – при четырёх импульсах на полупериоде при однофазном напряжении; *8* – при четырёх импульсах на полупериоде при трёхфазном напряжении.
На рис. 2 показаны относительное значение амплитуды: $U^*_0(U_2, U_4) = U_0(U_2, U_4) / U_{max}$ – постоянной составляющей (2-й гармоники или 4-й гармоники), где U_0 – текущее значение амплитуды постоянной составляющей (2-й гармоники или 4-й гармоники), в функции угла управления выпрямителем α; U_{max} – максимальное значение амплитуды синусоидального питающего напряжения. $A_{кон1}$ – конечное значение амплитуды 2-й гармоники в максимально выпрямленном напряжении постоянного тока при однофазном питающем напряжении; $A_{кон3}$ – конечное значение амплитуды 2-й гармоники в максимально выпрямленном напряжении постоянного тока при трёхфазном питающем напряжении.

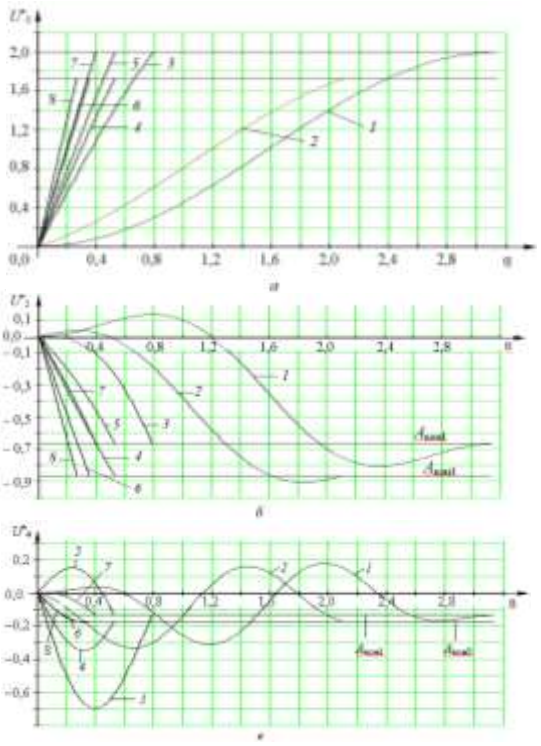


Рис. 2. Характер изменения амплитуд основной гармоники и высших гармонических составляющих: а – постоянной составляющей (основная гармоника); б – 2-й гармоники; в – 4-й гармоники

Приведённые зависимости показывают, что:
– изменение значения амплитуды постоянной составляющей выпрямленного напряжения в функции угла управления выпрямителем носит линейный характер (кривые *3*–*8*);

– эта линейность не зависит от количества импульсов напряжения, из которых образуется выпрямленное напряжение предлагаемым способом, в то время как классическое фазовое управление создаёт нелинейные зависимости (кривые *1* и *2*).

– изменение амплитуды 2-й гармоники при классическом фазовом управлении носит знакопеременный колебательный характер (кривые *1* и *2*), в то время как ШИМ-напряжение, сформированное предлагаемым способом, формирует однозначную вторую гармоническую составляющую (кривые *3*–*8*). Наложение действия второй знакопеременной гармоники на действие основной гармоники приводит к большему искажению результирующего тока, электромагнитного момента, чем наложение действия второй гармонической составляющей однозначного характера. Причём при классическом фазовом управлении определённые углы управления выпрямителем создают существенно большие амплитуды 2-й гармоники, чем её конечное значение. Предлагаемый способ получения регулируемого выпрямленного напряжения лишён этого недостатка;

– – изменение амплитуды 4-й гармоники при классическом фазовом управлении носит так же знакопеременный колебательный характер (кривые *1* и *2*), в то время как ШИМ-напряжение, сформированное предлагаемым способом, создаёт однозначную четвертую гармоническую составляющую (кривые *3*–*8*). Действие этой гармоники с таким амплитудным значением вносит меньшие искажения в результирующее выпрямленное напряжение**.**

Рассматриваемое ШИМ-управление электроприводом апробировано на составленной математической модели в вычислительной среде *Mathcad*. Работа электропривода описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$f1(U_я, i_я, \omega) = \frac{U_я}{L_{яΣ}} - \frac{R_{яΣ}}{L_{яΣ}} i_я - \frac{k\Phi_{ном}\omega}{L_{яΣ}} - \frac{\Delta U}{L_{яΣ}};$$

$$f2(i_я, \omega) = (k\Phi_{ном} i_я - M_{ст}) \frac{1}{J_{Σпр}},$$

где $U_я$ – напряжение в обмотке якоря электродвигателя, В; $i_я$ – ток в якоре электродвигателя, А; ω – угловая скорость вращения вала электродвигателя, рад/с; $L_{яΣ} = L_я + L_{дп} + L_{др}$ – суммарная индуктивность якорной цепи, здесь $L_я$ – индуктивность обмотки якоря; $L_{дп}$ – индуктивность обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; $L_{др}$ – индуктивность обмотки дросселя, последовательно включённого в цепь якоря, Гн; $R_{яΣ} = R_я + R_{дп} + R_{др}$ – суммарное активное сопротивление якорной цепи, здесь $R_я$ – активное сопротивление обмотки якоря; $R_{дп}$ – активное сопротивление обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; $R_{др}$ – активное сопротивление обмотки дросселя, включенной в якорную цепь, Ом; $k = c_e + k_f$ – конструктивный коэффициент двигателя, здесь c_e – конструктивный коэффициент, характеризующий ЭДС двигателя; k_f – конструктивный коэффициент, характеризующий магнитный поток двигателя; $\Phi_{ном}$ – номинальный магнитный поток электродвигателя, Вб; ΔU – падение напряжения в щеточном аппарате двигателя, равное 2–3 В; $J_{Σпр}$ – суммарный приведённый момент инерции электропривода, кг·м^2.

Блок-схема программы численных расчётов установившихся и переходных процессов в электроприводе с ШИМ-управлением представлена рис. 3. Логическое построение программы придаёт ей универсальность в том смысле, что позволяет выполнять расчёты для разных по параметрам указанных режимов различных электроприводов. В качестве примера исследовался электропривод управляющийся напряжением, сформированным из четырёх импульсов, расположенных между точками естественного пересечения синусоидальных питающих напряжений при трёхфазной мостовой схеме выпрямления (см. рис. 1, *г*).

Регулирование средневыпрямленного напряжения выполняется изменением угла управления ШИМ-напряжения по линейному закону $\alpha = \alpha_0 + \varepsilon t$, где α_0 – начальное значение угла управления. Практически и технически рационально полагать $\alpha_0 = 0$. Интенсивность изменения угла управления $\varepsilon = \alpha_{max}/t_{пуска}$ рассчитывается, исходя из желаемого времени процесса пуска. В электроприводе использован электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения со следующими номинальными данными (типоразмер 2ПН132МУХЛ4): $P_{ном}$ = 10,5 кВт; $U_{ном}$ = 220 В; активное сопротивление обмотки якоря $R_я$ = 0,14 Ом; $\omega_{ном}$ = 314 рад/с; $I_{ном}$ = 56,82 А; $\eta_{ном}$ = 0,84; $J_{дв}$ = 0,028 кгм^2, активное сопротивление обмотки дополнительных полюсов $R_{доп}$ = 0,094 Ом; активное сопротивление обмотки возбуждения $R_{возб}$ = 111 Ом; индуктивность обмотки возбуждения $L_{возб}$ = 0,0028 Гн. Электропривод характеризуется моментом холостого хода $M_{х.х} = 0{,}5M_{ном}$, $J_{Σ\ пр} = 1{,}5J_{дв}$, $t_{упр.\ пуск}$ = 2 с, $t_{упр.\ торм}$ = 2,5 с и после достижения им холостого хода осуществляется наброс нагрузки, равный номинальному моменту.

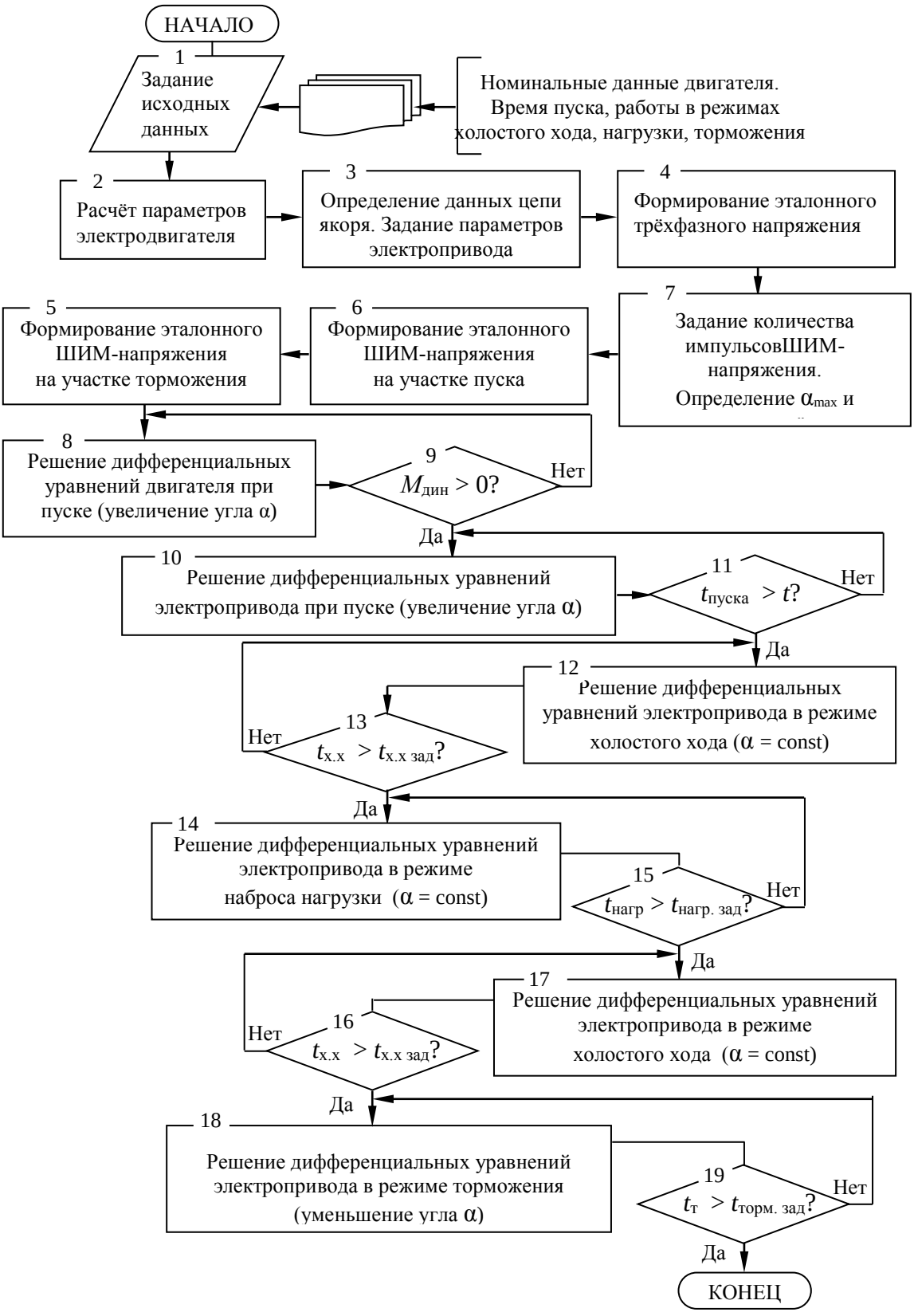


Рис. 3. Блок–схема программы расчёта режимов электропривода с ШИМ-управлением

Приведём результаты двух расчётов:
– когда ШИМ-управлением устанавливается максимальное средневыпрямленное напряжение ($\alpha_{max} = 1$) (рис. 4, *а*);
– когда средневыпрямленное напряжение соответствует углу управления ШИМ-напряжением $\alpha_1 = 0{,}1$ (рис. 4, *б*).

Оценивая полученные результаты, можно констатировать, что предлагаемое ШИМ-управление адекватно реализует необходимые процессы регулируемого электропривода. Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, носит высокочастотный колебательный характер, определяемый как схемой выпрямителя, так и количеством импульсов широтно-импульсного модулирования на несущей форме выпрямленного напряжения.

Следует акцентировать внимание на процессе торможения, который принципиально может разделяться на две части: первую часть можно назвать управляемым торможением, которое создаётся уменьшением напряжения на обмотке якоря двигателя, и вторую часть – торможение только моментом статического сопротивления механизма (рис. 4, *б*). Для того чтобы при торможении скорость механизма достигала нуля одновременно с достижением моментом двигателя, равным моменту статического сопротивления механизма, необходимо проведение наладочных режимов или их моделирование с целью определения необходимой для реализации этого состояния зависимости изменения угла ШИМ-управления.

ВЫВОДЫ

Обобщая результаты проведенных исследований режимов работы электропривода постоянного тока с двигателем независимого возбуждения на разработанной модели, можно отметить, что она позволяет полностью рассчитать установившиеся и переходные процессы в исследуемом электроприводе при разных нагрузках и конечных значениях скорости механизма, убеждает в достоверности предлагаемого ШИМ-управления и выполнении им предполагаемых положительных преимуществ такого управления.

Результаты исследований дают уверенность в результативности такого ШИМ-управления электроприводами постоянного тока. Применение различных законов изменения угла управления ШИМ-напряжением в переходных процессах создаёт возможности реализации требуемых ускорений/замедлений и необходимого позиционирования механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ получения регулируемого напряжения постоянного тока: патент № 11021 H 02 M 7/02 / В. П. Беляев; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т / № a 20070326; заявл. 29.03.2007; опубл. 15.06.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасті. – 2009. – № 2. – С. 147.

2. Беляев, В. П. Электрооборудование полиграфических машин / В. П. Беляев. – Минск : БГТУ, 2012. – 199 с.

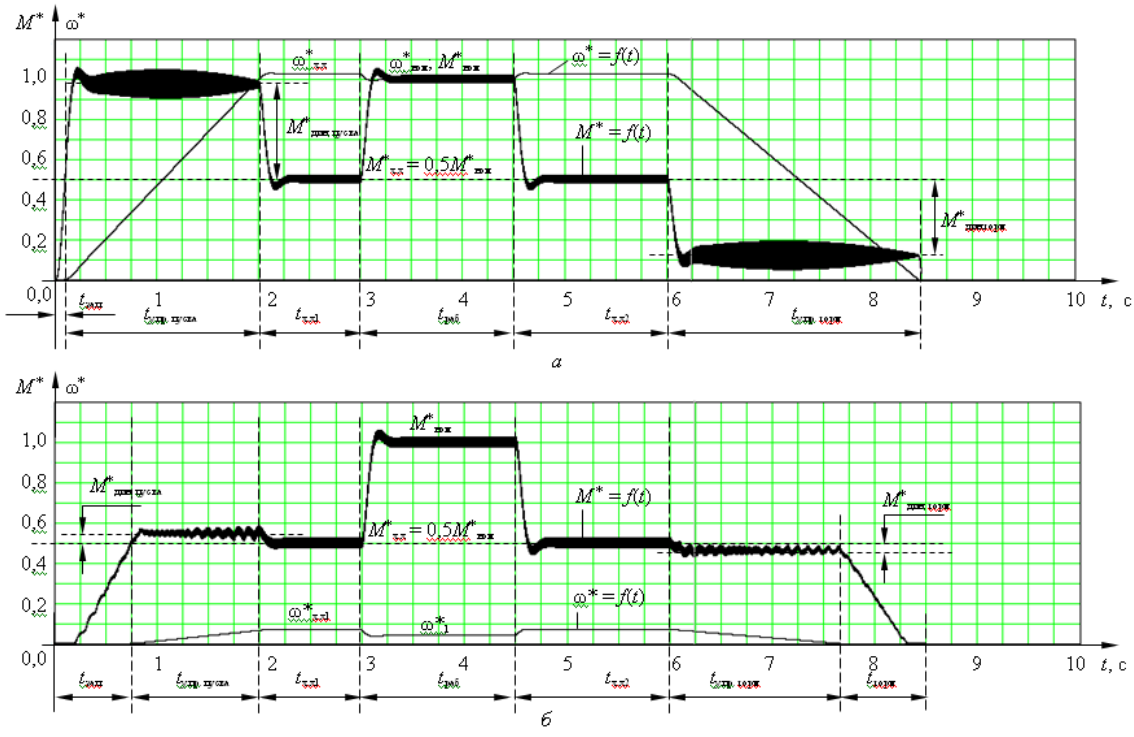


Рис. 4. Зависимости $\omega^* = f(t)$ и $M^* = f(t)$ при $\alpha_{max} = 1$ (а) и $\alpha_1 = 0,1$ (б)