

ПОЛИГРАФИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.313.33:004

В. П. Беляев

Белорусский государственный технологический университет

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассматривается оригинальное широтно-импульсное формирование выходного напряжения управляемого выпрямителя для регулируемого электропривода постоянного тока. Способ формирования запатентован. Он направлен на уменьшение воздействия высших гармонических составляющих питающего напряжения на режимы работы двигателя. Это уменьшает пульсаций тока в обмотке якоря, а значит пульсаций его электромагнитного момента и скорости. Выполнен гармонический анализ ШИМ-напряжения, подтвердивший качество сформированного напряжения. Анализ показывает, что выходная характеристика выпрямителя — $U_{\text{вых}} = f(\alpha_{\text{впр}})$ линейна. Это упрощает ее техническую реализацию в системе управления выпрямителем. Применение рассмотренного ШИМ-напряжения создает более качественные регулировочные характеристики электропривода по сравнению с традиционным фазовым управлением. Расчет переходных и установившихся режимов проведен на математической модели в среде Mathcad, где электропривод представлен дифференциальными уравнениями. Модель отражает физическое состояние электропривода, заключающееся в том, что эта модель решает электромагнитные процессы до момента возникновения движения якоря двигателя и продолжает решение динамики после начала движения с учетом его электромеханических процессов. Приводится пример расчетов в виде зависимостей электромагнитного момента $M_{\text{мот}}^* = f(t)$ и угловой скорости электродвигателя $\omega_{\text{мот}}^* = f(t)$.

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

V. P. Belyaev

Belarusian State Technological University

THE DIRECT CURRENT DRIVE FOR THE POLYGRAPHIC EQUIPMENT

The article deals with original pulse-width formation of target pressure of the operated rectifier for the adjustable electric drive of the direct current. The way of formation is patented. It is directed on reduction of influence of the higher harmonious components of feeding pressure on power setting. It reduces current pulsations in an anchor winding, so pulsations of its electromagnetic moment and speed. To confirm the quality of generated pressure the harmonic analysis of the PDM-pressure was made. The analysis shows, that the target characteristic of the rectifier — $U_{\text{avg}} = f(\alpha_{\text{man}})$ is linear. It simplifies its technical realisation in a control system by the rectifier. Application of the considered PWM-pressure creates better adjusting characteristics of the electric drive in comparison with traditional phase management. Calculation of the transitive and established modes is carried out on mathematical model in the environment of Mathcad where the electric drive is presented by the differential equations. The model reflects a physical condition of the electric drive, consisting that it solves electromagnetic processes till the moment of occurrence of the engine anchor movement and continues solving of dynamics after the beginning of movement with the account of its electromechanical processes. The example of calculations in the form of dependences of electromagnetic moment $M_{\text{mot}}^* = f(t)$ and angular speed of the electric motor $\omega_{\text{mot}}^* = f(t)$ is presented.

Key words: the direct current electric drive, PDM-pressure, modelling.

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. Основу таких электроприводов составляет электродвигатель, режимы которого должны реализовать алгоритмы работы технологической машины. Работа технологической машины

характеризуется скоростной и нагрузочной диаграммами движения всех ее узлов и механизмов, что должно в конечном счете, с определенной точностью выполняться электроприводом, соответствующим по своим энергетическим показателям, способам и методам управления технологическому процессу. Следовательно, на индивидуальный электропривод возлагаются две взаимосвязанные функции: электромеханическое преобразование энергии и управление технологическим процессом. Технологические процессы производственных установок определяют необходимость регулирования некоторых координат электропривода. Для удовлетворения технологических требований необходимо сформировать ряд механических характеристик электропривода, что 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, обеспечивающем глубокое регулирование скорости ($D \geq 10\ 000$), выпрямитель имеет низкий коэффициент мощности.

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 ($\cos\phi$) выпрямителя, линейаризации его выходной характеристики, рас-

ширению 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.

Основная часть. Оригинальный способ получения регулируемого ШИМ-напряжения постоянного тока на выходе управляемого однофазного или трехфазного полупроводникового выпрямителя изложен в источнике [1]. Сущность способа состоит в фиксации точного места расположения центров импульсов формируемого выпрямленного напряжения относительно точек естественного перехода синусоидального напряжения через нуль либо относительно точек естественного пересечения синусоидальных напряжений питающей однофазной или трехфазной сети, а также в регулировании выпрямленного напряжения путем изменения ширины импульсов относительно их центров равномерно в обе стороны по любому закону.

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 отрицательных полупериодов нерегулируемого однофазного или трехфазного переменного синусоидального напряжения. Причем формирование регулируемого напряжения постоянного тока выполняется из количества импульсов, равного m , где $m = 2, 3, 4, \dots$. Предлагаемый способ направлен на уменьшение пульсаций тока электродвигателя, питающегося таким регулируемым напряжением, а значит и пульсаций электромагнитного момента электродвигателя и его скорости. Применение указанного способа линейаризирует выходную характеристику выпрямителя — $U_{\text{вых}} = f(\alpha_{\text{упр}})$, уменьшает характер влияния высших гармонических составляющих напряжения на выходное напряжение выпрямителя, упрощает техническую реализацию системы управления выпрямителем в части линейаризации выходной характеристики, получает

более качественные регулировочные характеристики электропривода по сравнению с традиционным фазовым управлением. Целесообразно обратить внимание на то, что формирование ШИМ-напряжения можно 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).

Второй способ формирует импульсы регулируемого выпрямленного напряжения так, что фронт первого импульса, созданного на полупериоде, отстоит от точки естественного перехода на $\pi / 2m$.

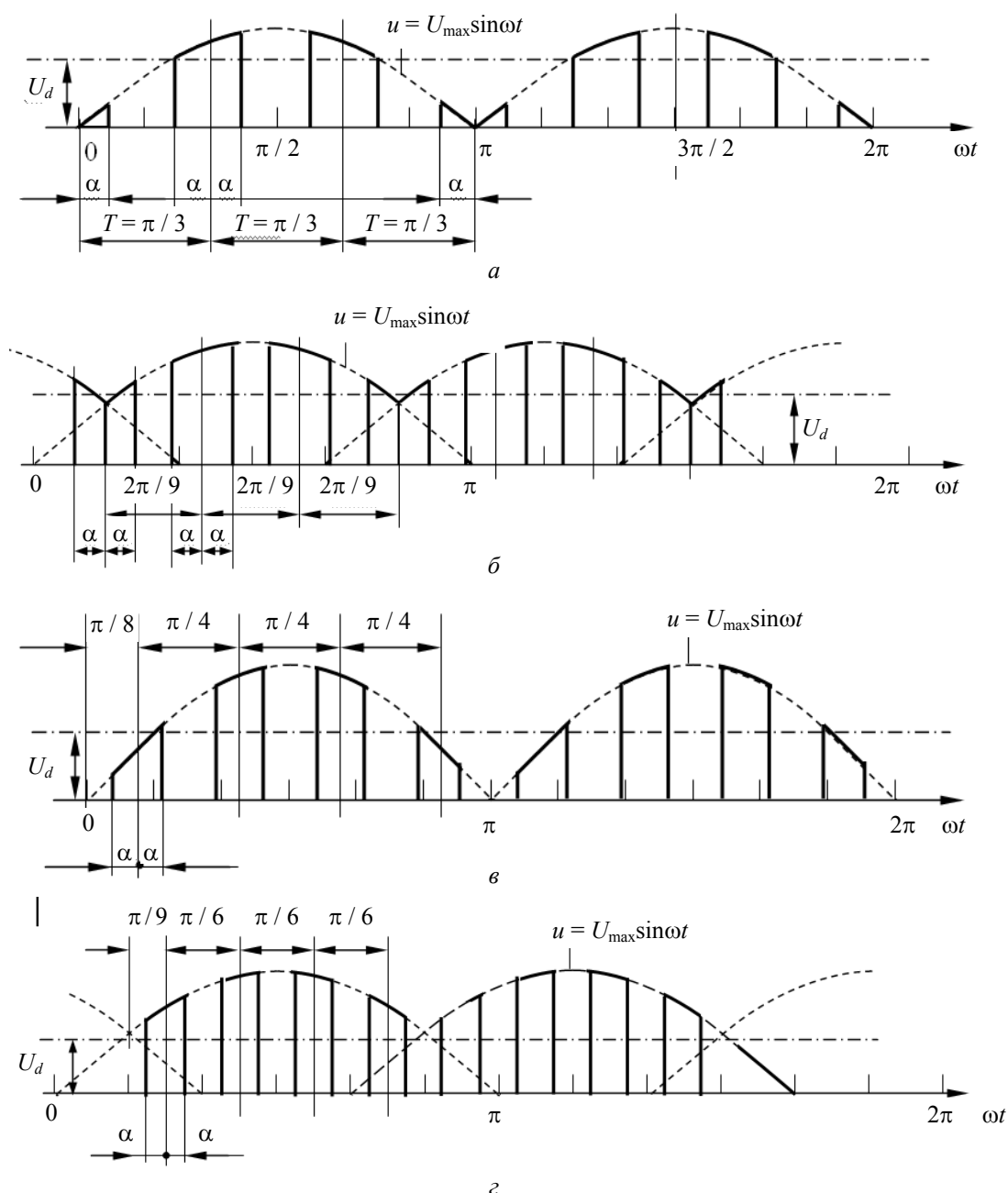


Рис. 1. Эпюры регулируемого выпрямленного напряжения:
 по первому способу: а — из однофазного переменного напряжения при $m = 4$;
 б — из трехфазного переменного напряжения при $m = 4$; по второму способу:
 в — из однофазного переменного напряжения при $m = 4$; г — из трехфазного переменного
 напряжения при $m = 4$; U_d — средневыврямленное напряжение;
 α — угол управления напряжением

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 нечетных членов натурального ряда чисел. В силу своей нечетности 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:

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

где k — номер гармоники, значение которой исследуется.

Был проведен анализ гармонического состава рассматриваемых напряжений в вычислительной среде *Mathcad* путем разложения их в ряды Фурье. Результатом анализа является характер изменения амплитуд основной гармоники и высших гармонических, приведенных на рис. 2. Здесь 1 — при фазовом управлении выпрямителем при однофазном напряжении; 2 — при фазовом управлении выпрямителем при трехфазном напряжении; 3 — при двух импульсах на полупериоде при однофазном напряжении; 4 — при двух импульсах на полупериоде при трехфазном напряжении; 5 — при трех импульсах на полупериоде при однофазном напряжении; 6 — при трех импульсах на полупериоде при трехфазном напряжении; 7 — при четырех импульсах на полупериоде при однофазном напряжении; 8 — при четырех импульсах на полупериоде при трехфазном напряжении.

На рис. 2 имеем: $U_0^*(U_2, U_4) = U_0(U_2, U_4) / U_{\max}$ — относительное значение амплитуды 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. $A_{\text{кон1}}$ — конечное значение амплитуды 2-й гармоники в максимально выпрямленном

напряжении постоянного тока при однофазном питающем напряжении; $A_{\text{кон3}}$ — конечное значение амплитуды 2-й гармоники в максимально выпрямленном напряжении постоянного тока при трехфазном питающем напряжении.

Приведенные зависимости показывают следующее:

— значение амплитуды постоянной составляющей выпрямленного напряжения в функции угла управления выпрямителем носит линейный характер (зависимости 3–8);

— данная линейность не зависит от количества импульсов напряжения, из которых формируется выпрямленное напряжение предлагаемым способом, в то время как классическое фазовое управление приводит к нелинейным зависимостям (зависимости 1 и 2).

— изменение амплитуды 2-й гармоники при классическом фазовом управлении носит знакопеременный колебательный характер (зависимости 1 и 2), в то время как ШИМ-напряжение, сформированное предлагаемым способом, создает однозначную вторую гармоническую составляющую (зависимости 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. Причем при классическом фазовом управлении определенные углы управления выпрямителем создают существенно большие амплитуды 2-й гармоники, чем ее конечное значение. Этого не наблюдается при предлагаемом способе получения регулируемого выпрямленного напряжения;

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

Апробация рассматриваемого ШИМ-управления электроприводом проводилась на математической модели в вычислительной среде *Mathcad*. Функционирование электропривода описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$f1(U_{\text{я}}, i_{\text{я}}, \omega) = \frac{U_{\text{я}}}{L_{\text{я}\Sigma}} - \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{L_{\text{я}\Sigma}} i_{\text{я}} - \frac{k\Phi_{\text{ном}}\omega}{L_{\text{я}\Sigma}} - \frac{\Delta U}{L_{\text{я}\Sigma}}; \\ f2(i_{\text{я}}, \omega) = (k\Phi_{\text{ном}} i_{\text{я}} - M_{\text{ст}}) \frac{1}{J_{\Sigma \text{пр}}},$$

где $U_{\text{я}}$ — напряжение в обмотке якоря электродвигателя, В; $i_{\text{я}}$ — ток в якоре электродвигателя, А; ω — угловая скорость вращения вала электродвигателя, рад/с; $L_{\Sigma} = L_{\text{я}} + L_{\text{дп}} + L_{\text{др}}$ — суммарная индуктивность якорной цепи, здесь $L_{\text{я}}$ — индуктивность обмотки якоря; $L_{\text{дп}}$ — индуктив-

ность обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; $L_{\text{др}}$ — индуктивность обмотки дросселя, включенного в якорную цепь, Гн; R_{Σ} — суммарное активное сопротивление якорной цепи, здесь $R_{\text{я}}$ — активное сопротивление обмотки якоря.

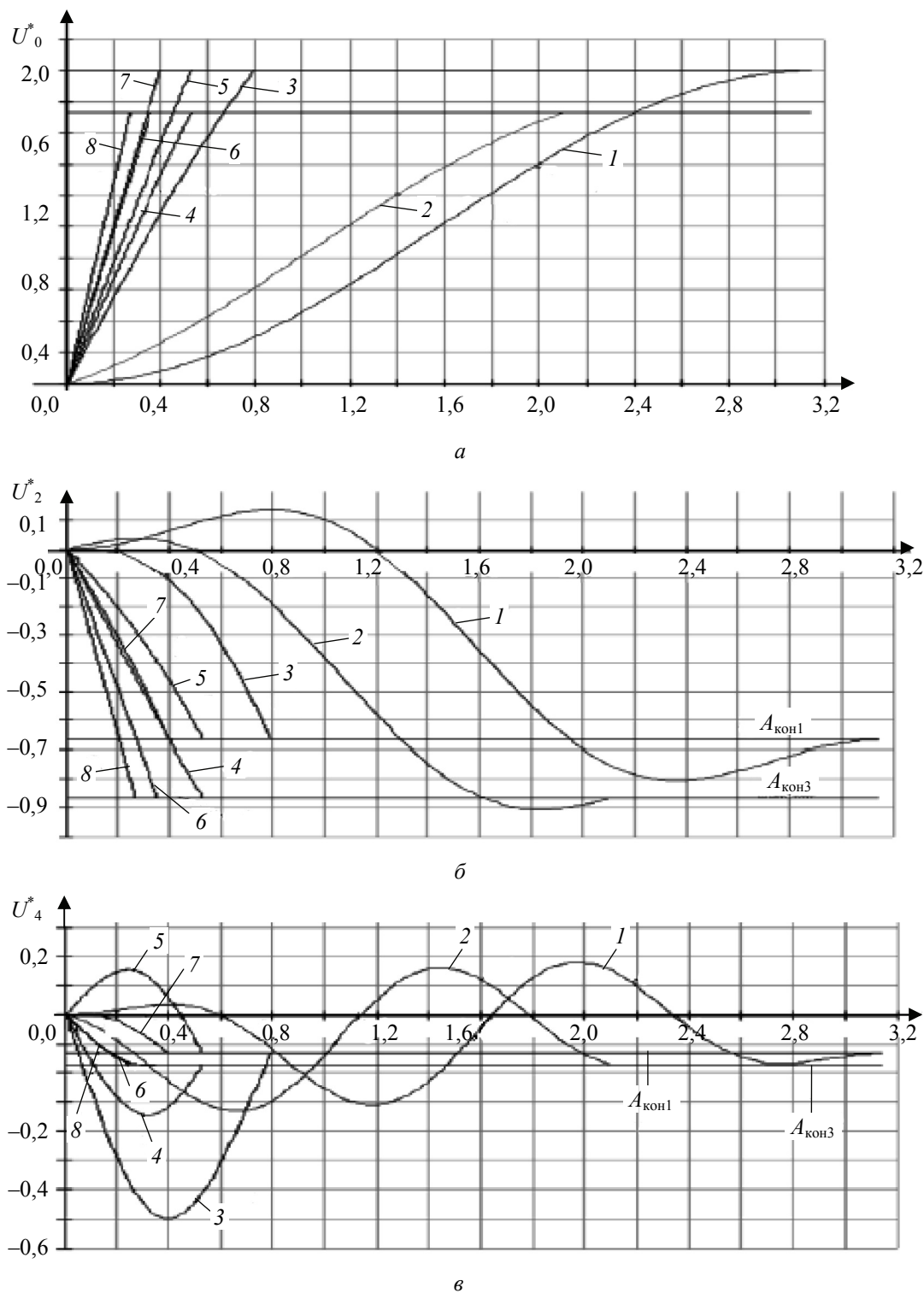


Рис. 2. Характер изменения амплитуд основной гармоники и высших гармонических:
 а — постоянной составляющей (основная гармоника);
 б — 2-й гармоники; в — 4-й гармоники

В данной формуле также имеем: $R_{\text{дп}}$ — активное сопротивление обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; $R_{\text{др}}$ — 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; $\Phi_{\text{ном}}$ — номинальный магнитный поток электродвигателя, Вб; ΔU — падение напряжения в щеточном аппарате двигателя, равное 2...3 В; $J_{\Sigma \text{пр}}$ — суммарный приведенный момент инерции электропривода, кг·м².

Блок-схема алгоритма численных расчетов установившихся и переходных процессов в электроприводе с ШИМ-управлением представлена на рис. 3. Логическое построение программы придает ей универсальность в том смысле, что позволяет выполнять расчеты для разных по параметрам указанных режимов различных электроприводов. В качестве примера исследовался электропривод управляющийся напряжением, сформированным из четырех импульсов, расположенных между точками естественного пересечения синусоидальных питающих напряжений при трехфазной мостовой схеме выпрямления (см. рис. 1, з). 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 $\varepsilon = \alpha_{\text{max}} / t_{\text{пуска}}$ рассчитывается, исходя из желаемого времени процесса пуска.

В электроприводе использован электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения со следующими номинальными данными (типоразмер 2ПН132МУХЛ4): $P_{\text{ном}} = 10,5$ кВт; $U_{\text{ном}} = 220$ В; активное сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,14$ Ом; $\omega_{\text{ном}} = 314$ рад/с; $I_{\text{ном}} = 56,82$ А; $\eta_{\text{ном}} = 0,84$; $J_{\text{дв}} = 0,028$ кгм², активное сопротивление обмотки дополнительных полюсов $R_{\text{доп}} = 0,094$ Ом; активное сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{возб}} = 111$ Ом; индуктивность обмотки возбуждения $L_{\text{возб}} = 0,0028$ Гн. Электропривод характеризуется моментом холостого хода $M_{\text{х. х}} = 0,5M_{\text{ном}}$, $J_{\Sigma \text{пр}} = 1,5J_{\text{дв}}$, $t_{\text{упр. пуск}} = 2$ с, $t_{\text{упр. торм}} = 2,5$ с и после достижения им холостого хода осуществляется наброс нагрузки, равный номинальному моменту. Приведем результаты двух расчетов:

1) ШИМ-управлением устанавливается максимальное средневыпрямленное напряжение ($\alpha_{\text{max}} = 1$) (рис. 4, а);

2) средневыпрямленное напряжение соответствует углу управления ШИМ-напряжения $\alpha_1 = 0,1$ (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 создается 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.

Заключение. 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 промышленных установок. Применение различных законов изменения угла управления ШИМ-напряжением в переходных процессах создает возможности реализации требуемых ускорений и необходимого позиционирования механизма. Созданные устройства с регулируемым выходным напряжением по предлагаемому способу могут быть использованы в машиностроительной, строительной, металлургической, перерабатывающей, добывающей промышленности, гальванотехнике и других отраслей промышленности.

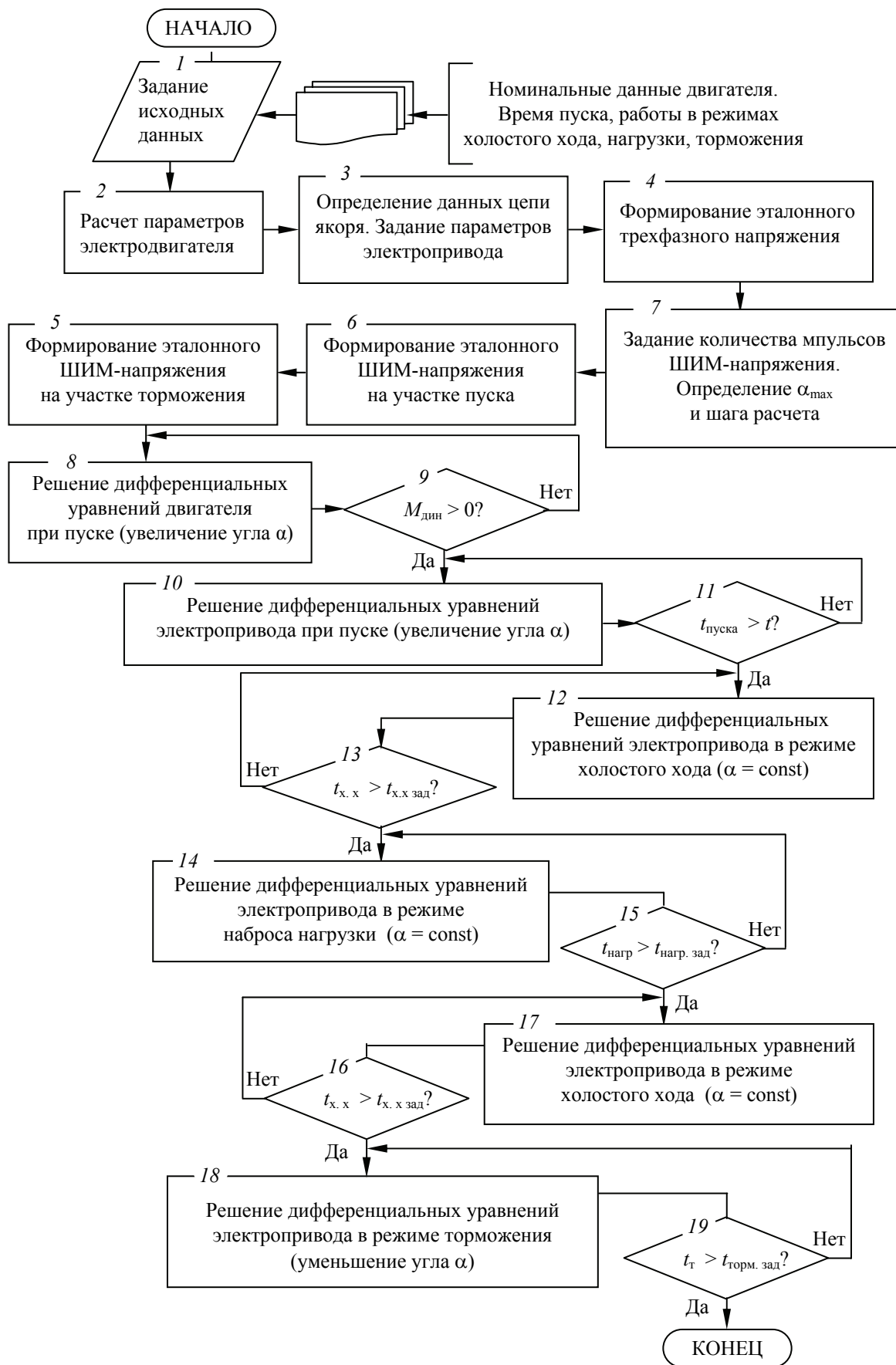


Рис. 3. Блок-схема алгоритма численных расчетов установившихся и переходных процессов в электроприводе с ШИМ-управлением

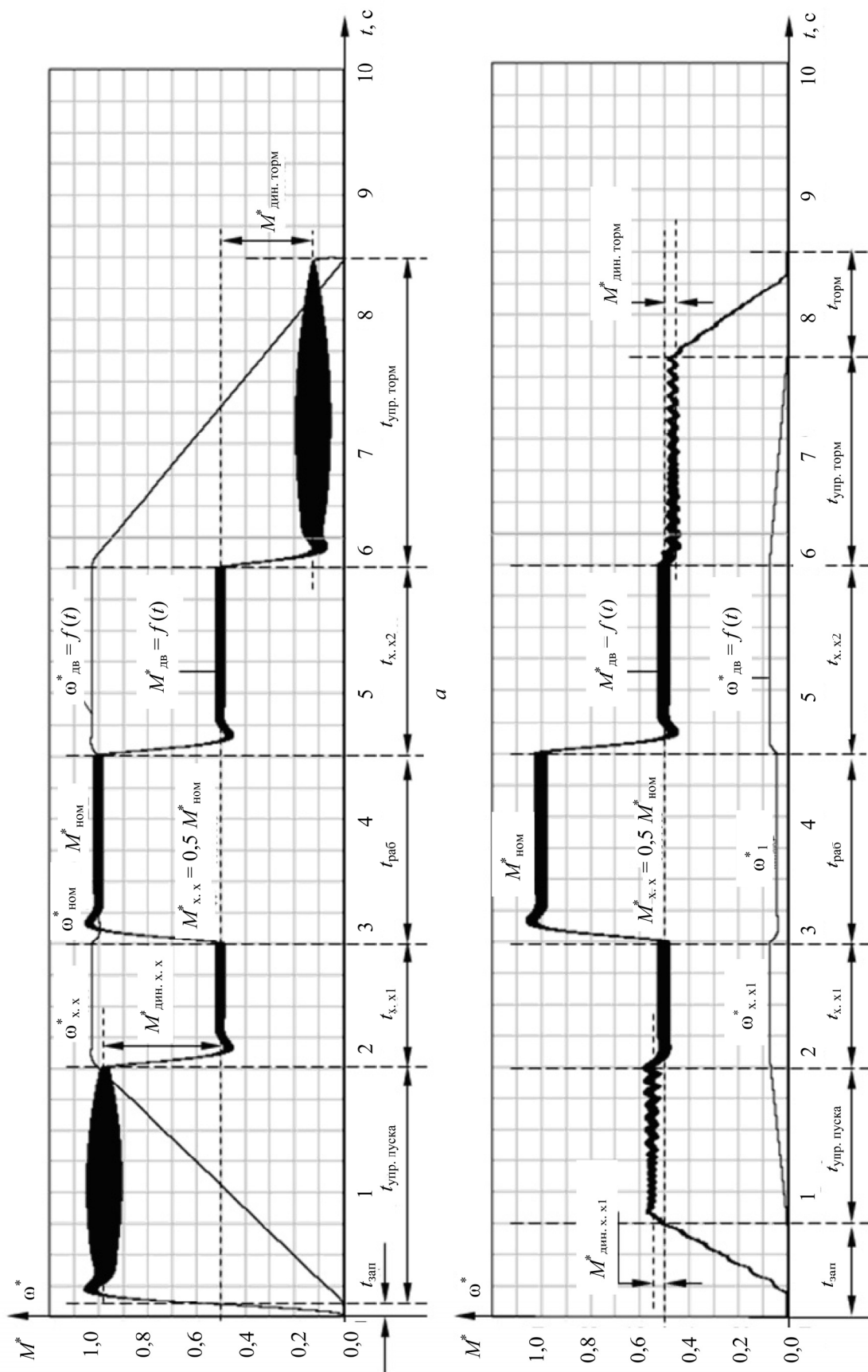


Рис. 4. Зависимости $\omega^* = f(t)$ и $M^* = f(t)$ при $\alpha_{max} = 1$ (а) и $\alpha_1 = 0,1$ (б)

Литература

Способ получения регулируемого напряжения постоянного тока: патент № 11021 Н 02 М 7/02 / В. П. Беляев; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т / № а 20070326; заявл. 29.03.2007; опубл. 15.06.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2009. № 2. С. 147.

References

Belyaev V. P. *Sposob polucheniya reguliruemogo napryazheniya postoyannogo toka* [Way of reception of adjustable pressure of a direct current]. Patent BY, no. 20070326, 2009.

Информация об авторе

Беляев Валерий Павлович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Beliaev@belstu.by

Information about the author

Belyaev Valeriy Pavlovich — PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Beliaev@belstu.by

Поступила 16.03.2016