

УДК 621.376.54:621.316.722

В. П. Беляев, М. А. Тимошенко

Белорусский государственный технологический университет

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

В статье приведены результаты исследования параметрического управления электроприводом на основе асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, реализуемого полупроводниковым регулятором напряжения. Выходное ШИМ-напряжение регулятора формируется в соответствии с запатентованным способом. Основные исследования составляют изучение процессов пуска электропривода в функции изменения значений действующего напряжения, прикладываемого к обмоткам статора электродвигателя. Даны зависимости для классического (фазового) параметрического управления и для ШИМ-управления. Эти зависимости однозначны. Выявлено, что время электромагнитных переходных процессов в двигателе $t_{\text{зап}}$ при управляемом пуске до начала движения ($M_{\text{дв}} = M_{\text{х.х}}$) занимает соответствующую долю общего времени, задаваемого на пуск $t_{\text{пуск}}$. В оставшийся промежуток времени развиваются электромеханические переходные процессы в электроприводе, создающие определенные ускорения технологической машины, которые могут не соответствовать нормируемым значениям. Предлагается два этапа задания времени пуска: время электромагнитных переходных процессов в двигателе и время электромеханических переходных процессов в электроприводе (решение уравнения движения). Заданием изменения значений действующего напряжения на втором этапе и достигается получение нормируемых ускорений технологической машины. Для оценки рассмотренных вопросов разработана модель регулируемого электропривода с ШИМ-управлением в вычислительной среде *MathLab-Simulink*. Компоновка модели выполнена с использованием штатных блоков *Simulink* и оригинально составленных. В модели асинхронная машина представлена системой дифференциальных уравнений на основе теории обобщенной машины. Модель учитывает задание времени упомянутых двух этапов пуска и последовательное решение электромагнитных переходных процессов в двигателе, а затем электромеханические переходные процессы в электроприводе. Приведены схема модели и один из результатов расчета процесса пуска печатной машины как технологического объекта (эпюры электромагнитного момента и скорости).

Ключевые слова: электропривод переменного тока, широтно-импульсная модуляция напряжения, моделирование.

Для цитирования: Беляев В. П., Тимошенко М. А. Асинхронный электропривод с полупроводниковым регулятором напряжения // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2022. № 1 (255). С. 14–21.

V. P. Belyayev, M. A. Timoshenko

Belarusian State Technological University

**ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH
SEMICONDUCTOR VOLTAGE REGULATOR**

The material of the article presents the results of a study of parametric control of an electric drive based on an asynchronous squirrel-cage motor, implemented by a semiconductor voltage regulator. The PWM output voltage of the regulator is generated in accordance with a patented method. The main research is the study of the processes of starting an electric drive as a function of changing the values of the effective voltage applied to the stator windings of the electric motor. These dependences are given for classical (phase) parametric control and for PWM control. These dependencies are unambiguous. It was revealed that the time of electromagnetic transient processes in the engine t_{lag} with a controlled start before the start of motion ($T_{\text{dv}} = T_{\text{idling}}$) takes the corresponding share of the total time set for start t_{start} . In the remaining period of time, electromechanical transients develop in the electric drive, creating certain accelerations of the technological machine, which may not correspond to the standardized values. Two stages of setting the starting time are proposed: the time of electromagnetic transients in the engine and the time of electromechanical transients in the electric drive (solution of the equation of motion). By setting the change in the values of the effective voltage at the second stage, it is possible to obtain the standardized accelerations of the technological machine. To assess the issues considered, a model of a variable electric drive with PWM control in the MathLab-Simulink computing environment has been

developed. The layout of the model is developed using standard Simulink blocks and originally compiled. In the model, an asynchronous machine is represented by a system of differential equations based on the theory of a generalized machine. The model takes into account the setting of the time of the mentioned two stages of starting and the sequential solution of electromagnetic transients in the motor, and then electromechanical transients in the electric drive. The diagram of the model and one of the results of calculating the process of starting the printing machine as a technological object (diagrams of the electromagnetic moment and speed) are presented.

Key words: AC electric drive, pulse width voltage modulation, modeling.

For citation: Belyayev V. P., Tymoshenko M. A. Asynchronous electric drive with semiconductor voltage regulator. *Proceedings of BSTU, issue 4, Print- and Mediatechnologies, 2022, no. 1 (255), pp. 14–21* (In Russian).

Введение. Подобие и моделирование облегчают единое описание процессов в самых различных сферах природы [1].

Промышленные машины и установки для выполнения технологического цикла оснащены электромеханическими системами, в частности на основе регулируемого электропривода переменного тока, использующего в качестве электромеханического преобразователя электрической энергии асинхронный короткозамкнутый электродвигатель. Всем производственным механизмам целесообразно организовывать управляемый по интенсивности разгон, обеспечивая в их кинематике безударное прохождение механического момента от вала электродвигателя. Известно, что это создает долгосрочную эксплуатацию механической части технологического оборудования, для которого существуют регламентные значения угловых и линейных ускорений в динамических процессах [2]. Обеспечение оптимального с этой точки зрения разгона достигается управлением пуском приводного электродвигателя производственного механизма. Регулирование скорости электропривода переменного тока в настоящее время организуется взаимосвязанным изменением частоты

и амплитуды питающего обмотки статора электродвигателя напряжения (частотное управление) или фазовым изменением питающего обмотки статора электродвигателя напряжения (параметрическое управление, рис. 1, а, б).

Частотное управление формирует качественные механические характеристики электропривода в большом диапазоне регулирования скорости (пусковые, регулировочные и тормозные), но выполняется сложными полупроводниковыми устройствами (автономные инверторы напряжения – в производственной и коммерческой среде именуемые преобразователями частоты). Параметрическое управление реализуется полупроводниковым регулятором напряжения, именуемым в производственной и коммерческой среде устройством плавного пуска или *soft starter* [3].

Классическое фазовое управление обладает определенными недостатками по созданию качественных механических характеристик электропривода, небольшим диапазоном регулирования скорости [4, 5, 6], однако в части формирования переходных процессов технологического оборудования успешно используется.

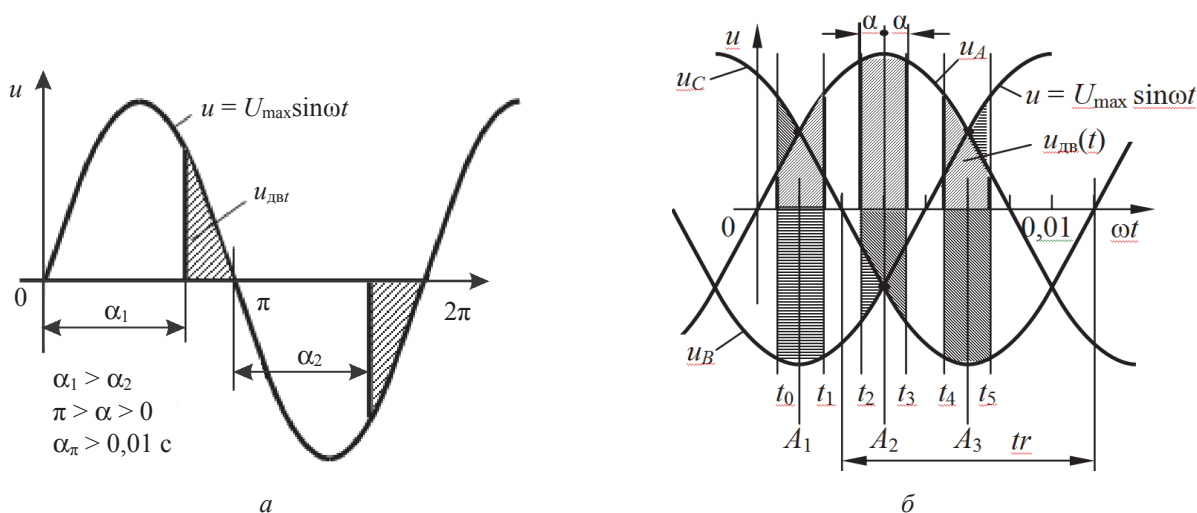


Рис. 1. Эпюры формирования напряжения фазовым способом
а – классическое фазовое управление; б – ШИМ-управление

Основная часть. Изменение электромагнитного и механического моментов двигателя определяется, в частности, действующим значением напряжения, прикладываемого к обмоткам статора асинхронного двигателя, что отражено приведенным ниже выражением, выведенным на основе теории обобщенной машины [7]:

$$M_3 = \frac{3}{2} \times \frac{|\bar{u}_s|^2 a_{12} a_{21} \delta}{R_s \left[(a_{11}^2 + \omega_s^2) (\delta_k^2 + \delta^2) + 2a_{12} a_{21} \omega_s \delta \right]}, \quad (1)$$

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; ω_r – частота вращения ротора; $\delta = \omega_s - \omega_r$ – параметр абсолютного скольжения; δ_k – критическое значение параметра абсолютного скольжения; a_{11} , a_{12} , a_{21} – коэффициенты, составленные из параметров эквивалентной схемы электродвигателя переменного тока [2].

Поскольку действующее напряжение позиционируется как интегральный показатель, то принципиально не имеет значения, изменяется угол фазового управления переменным напряжением в соответствии с рис. 1, а или 1, б.

Классическое фазовое управление декларирует, что угол управления α формирует временной отрезок отсутствия напряжения на нагрузке (рис. 1, а, угол α изменяется от π до нуля). Однако углом управления можно оценивать присутствие напряжения питания на нагрузке (угол управления α изменялся бы от нуля до π). Первое представление угла фазового управления обосновано более простой технической реализацией полупроводникового регулятора напряжения как в части силовой схемы, так и в части системы управления.

Возникает вопрос, какие значения приобретает действующее напряжение в функции угла управления при каком-либо законе его изменения от нулевого до максимального значения (время пуска – обозначим tp)? Одним из ответов на этот вопрос будет полученный результат такого исследования в среде *Mathcad* для классического фазового управления синусоидальным напряжением по общеизвестному выражению (2) и для ШИМ-управления по выражению (3), представленный на рис. 2:

$$u_{\text{дейст}}(t) = \sqrt{\frac{1}{0,01} \int_0^t (U(t))^2 dt}, \quad (2)$$

где $U(t) = U_{\text{max}} \sin \omega t$.

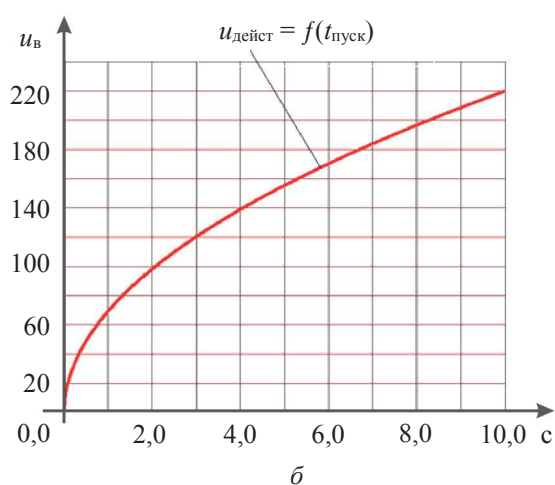
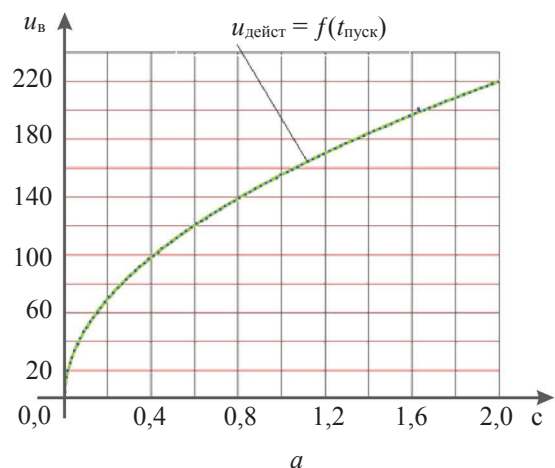


Рис. 2. Зависимости действующего напряжения в функции времени пуска:

а – для классического фазового управления (пунктирная линия) и для ШИМ-управления (сплошная линия); б – то же, что а, при $t_{\text{пуск}} = 10$ с

Для ШИМ-управления, выбранного к исследованию, количество импульсов m на периоде принято равным трем [8]. Вычисление значений действующего напряжения выполнялось по приведенному ниже выражению (см. рис. 1, б):

$$\begin{aligned} (u_{\text{дейст}}(n))^2 = & \frac{1}{0,01} \int_{A1-nh}^{A1+nh} (U1(t))^2 dt + \\ & + \frac{1}{0,01} \int_{A2-nh}^{A2+nh} (U1(t))^2 dt + \\ & + \frac{1}{0,01} \int_{A3-nh}^{A3+nh} (U1(t))^2 dt, \quad (3) \end{aligned}$$

где $A_{k,q} = \left[\left(j \frac{tr}{2m} \right) + tr(Zp_q) \right]_q$ – центры расположения импульсов ШИМ-напряжения (в общем виде); j – показатель, определяющий место центров

импульсов на первом периоде повторяемости tr ; $j = 1, 3, 5$; q – номер периода повторяемости (каждый полупериод питающего напряжения), на котором выполняется увеличение угла управления напряжением (шириной импульса), $k = 1, 2, 3$; $q = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \dots$; Zp ; $Zp = tp / tr$; n – количество периодов повторяемости tr за время пуска tp ; h – шаг изменения угла управления.

Для $m = 3$ имеем $k = 1, 2, 3$ и координаты центров расположения импульсов на всех полупериодах напряжения ШИМ-управления (периоды повторяемости) вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} A_1 &= 1A_1 = \frac{1 \cdot 0,01}{2 \cdot 3} = 0,001667 \text{ с;} \\ A_2 &= 3A_1 = \frac{3 \cdot 0,01}{2 \cdot 3} = 0,005 \text{ с;} \\ A_3 &= 5A_1 = \frac{5 \cdot 0,01}{2 \cdot 3} = 0,008333 \text{ с.} \end{aligned} \quad (4)$$

В рассматриваемом ШИМ-регулировании на каждом полупериоде синусоидального напряжения переменного тока, который обозначим как период повторяемости, располагаются m импульсов, равных трем, регулируемых по ширине. Длительность периода повторяемости для напряжения частотой $f = 50$ Гц равна $tr = 1 / (2f) = 0,01$ с. При этом максимальный угол управления составит $\alpha_{\max} = tr / (2m) = 0,001667$ с. Время увеличения действующего напряжения от минимального до максимального значений обозначим tp – время пуска (см. рис. 1, б) [9]. Анализ приведенных на рис. 2 зависимостей $u_{\text{дейст}} = f(t_{\text{пуск}})$ для классического фазового управления (пунктирная линия) и для ШИМ-управления (сплошная линия) приводит к заключению, что при прямопропорциональном изменении значений угла управления они как при классическом фазовом управлении, так и при ШИМ-управлении **однозначны и криволинейны**. Этим зависимостям присуще достаточно интенсивное нарастание значений на начальных этапах увеличения угла управления с последующим уменьшением нарастания в конце переходного процесса. А поскольку электромагнитный момент пропорционален квадрату напряжения, то и скоростная характеристика электропривода $\omega = f(t)$ согласно уравнению движения будет соответствовать этим тенденциям. Здесь следует напомнить, что при прямой подаче напряжения на обмотки статора электродвигателя, находящегося в составе электропривода, начинают развиваться электромагнитные переходные процессы в двигателе (первый этап процесса пуска обозначим как время запаздывания движения $t_{\text{зан}}$), а при достижении его электромагнитным моментом значения, равного

моменту статического сопротивления механизма, возникают электромеханические процессы в электроприводе (второй этап процесса пуска), т. е. в технологической машине, находящейся в состоянии покоя, через ее кинематику начнет действовать интенсивно нарастающий механический момент, приводящий ее в движение с соответствующим ускорением. При увеличении электромагнитного момента на первом этапе создаются условия перемещения движущим моментом вала двигателя кинематических звеньев привода технологической машины и устранение в них люфтов и зазоров, создавая силовое «натяжение» в кинематических звеньях, не приводящее их в движение. Для трогания технологической машины необходимо создать на валу приводного электродвигателя начальный механический момент $M_{\text{нач}}$, превосходящий момент статического сопротивления механизма $M_{\text{ст}}$. Он может быть равным моменту холостого хода $M_{\text{х.х}}$, промежуточному значению или полному моменту (номинальному) технологической машины. Значение напряжения, соответствующее варианту холостого хода, вычисляется по выражению

$$\begin{aligned} |\bar{u}_{\text{нач}}| &= \sqrt{\frac{2M_{\text{х.х}}R_s}{3a_{12}a_{21}\omega_s}} \times \\ &\times \sqrt{[(a_{11}^2 + \omega_s^2)(\delta_k + \omega_s^2) + 2a_{12}a_{21}\omega_s^2]}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $|\bar{u}_{\text{нач}}|$ – модуль начального значения напряжения на обмотках статора электродвигателя при трогании [9].

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 определим как время запаздывания начала движения электропривода ($t_{\text{зан}}$). Затем он приводит во вращение вал двигателя согласно уравнению движения электропривода, увеличивая его скорость, что определяется интенсивностью возрастания напряжения как управляющего воздействия. Характеристическая точка электропривода, 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 греющими потерями мощности в двигателе, а после достижения $s_{\text{кр}}$ характеристическая точка переходит в зону «скольжений» $0 < s < s_{\text{кр}}$, в которой процесс оценивается как «мягкий» пуск, сопровождающийся греющими потерями мощности, сопоставимыми с номинальными потерями. В конце разгона характеристическая точка состояния электропривода стремится

к условию равновесия, например к $M_{дв} = M_{х. х}$. Интенсивность возрастания управляющего воздействия может определяться требованиями со стороны технологической машины, что в основном выливается в получение за время пуска ускорения, не превышающего для нее допустимого значения. Таким образом, именно на втором этапе переходного процесса следует задавать интенсивность нарастания действующего напряжения на обмотках статора двигателя, чтобы реализовать желаемые ускорения электропривода, т. е. в системе управления регулятором напряжения должны задаваться время запаздывания и время пуска. В инструкциях на устройства плавного пуска [10, 11, 12] или в некоторой научно-технической литературе, например [13, 14], об этом не говорится, а только указывается возможное задание изменяемого времени пуска **одним значением**.

Для оценки рассмотренных электромагнитных переходных процессов в двигателе и электромеханических процессов в электроприводе разработана модель регулируемого электропривода в вычислительной среде *Matlab-Simulink* [15]. Модель представлена на рис. 3. Компоновка модели проведена с использованием штатных и оригинально разработанных блоков. В модели асинхронная машина представлена системой дифференциальных уравнений на основе теории обобщенной машины [7], что реализуется блоками 4, 5 и 7. Блок 7 вычисляет электромагнитный момент двигателя ($M_{дв}$), задаваемый системой широтно-импульсного напряжения на обмотках статора двигателя. ШИМ-напряжение соответствует принципу, изложенному в изобретении [8] (блоки 1, 2 и 3). Согласно ему оно формируется импульсами напряжения. Модель оформлена как универсальный объект в отношении задания численных значений параметров электродвигателя и электропривода. Это достигается введением *M*-файла, содержащего указанные значения.

Импульсы расположены определенным способом на положительных и отрицательных полупериодах нерегулируемого трехфазного синусоидального напряжения, питающего полупроводниковый регулятор, и регулируются по ширине (рис. 1, б). Теоретически их может быть в количестве 3, 6, 9 и т. д. Такая форма ШИМ-напряжения уменьшает уровень токов от высших гармонических составляющих питающего напряжения, снижает уровень греющих потерь в активной составляющей общих потерь двигателя. Обозначенные преимущества приводят к определенному расширению диапазона регулирования скорости двигателя, создают условия энергосбережения в его установившихся

и переходных режимах. Апробация модели выполнялась расчетами режимов технологического цикла двухкрасочной офсетной печатной машины, приводимой в движение асинхронным двигателем типоразмера 4A80B2У3 со следующими параметрами: $P_{ном} = 2,2$ кВт; $U_{ном. ф} = 220$ В; $\omega_{ном} = 298,3$ рад/с; $\omega_0 = 314$ рад/с; $I_{ном} = 4,616$ А; $\eta_{ном} = 83\%$; $\cos\phi_{ном} = 0,87$; $R_s = 3,304$ Ом; $R_r = 2,346$ Ом; $L_s = 0,398$ Ом; $M_{ном} = 7,37$ Н·м; $L_r = 0,397$ Ом; $L_m = 0,383$ Ом; $J_{дв} = 0,0021$ кг·м²; $\Delta p_{ном} = 450,6$ Вт; $s_{ном} = 4,3\%$; $s_{кр} = 38\%$.

В рамках рассматриваемого вопроса (изменение действующего напряжения) из всего технологического цикла печатной машины интерес представляют переходные процессы электропривода при ее пуске. Для примера приведем результат одного из расчетов зависимости $\omega^* = f(t)$ при фазовом (1) и ШИМ-управлении (2) при одинаковых параметрах электропривода для каждого варианта (рис. 4).

Оценка указанных зависимостей при задании общего времени $t_{пуск} = 10$ с изменения угла управления α с $\varepsilon_\alpha = f(t) = \text{const}$, где $\varepsilon_\alpha = \alpha_{\max} : tp$, привела к практическому выводу, что время достижения электромагнитным моментом двигателя момента статического сопротивления механизма, после которого начнется его движение, $t_{зап. шим}$ и $t_{зап. фаз}$ составляет существенную часть общего времени пуска электропривода $t_{пуск}$ и $t_{зап. фаз} > t_{зап. шим}$. На разгон самой машины временной отрезок мал $t_{\omega^* = 1 \text{ шим}} > t_{\omega^* = 1 \text{ фаз}}$. Здесь указано время достижения скорости ротора двигателя первый раз значения $\omega^* = \omega_r / \omega_{ном} = 1$. Это приводит к несоблюдению нормированных ускорений.

Момент указанного достижения при реальных $M_{х. х}$, например, для печатных машин, возникает при подходе к области критического «скольжения». Значение действующего напряжения при этом составляет 60–80% $U_{ном. ф}$. Такая ситуация подсказывает, что нет необходимости в продолжении изменения угла управления напряжением, а целесообразнее выполнить **преждевременное** подключение обмоток статора двигателя напрямую к входному напряжению ПРН (функция байпас (*bypass*)) [16]. Для более корректного управления пуском технологической машины следует задавать время увеличения действующего напряжения в два этапа: до момента $M_{дв} = M_{х. х}$ и после – с последующим заданием темпа его нарастания, позволяющим соблюдать или обеспечивать нормированное для этой машины ускорение.

При пуске сначала развиваются электромагнитные переходные процессы в двигателе (время запаздывания движения), а после начала движения электромеханические процессы в электроприводе (этап изменения скорости).

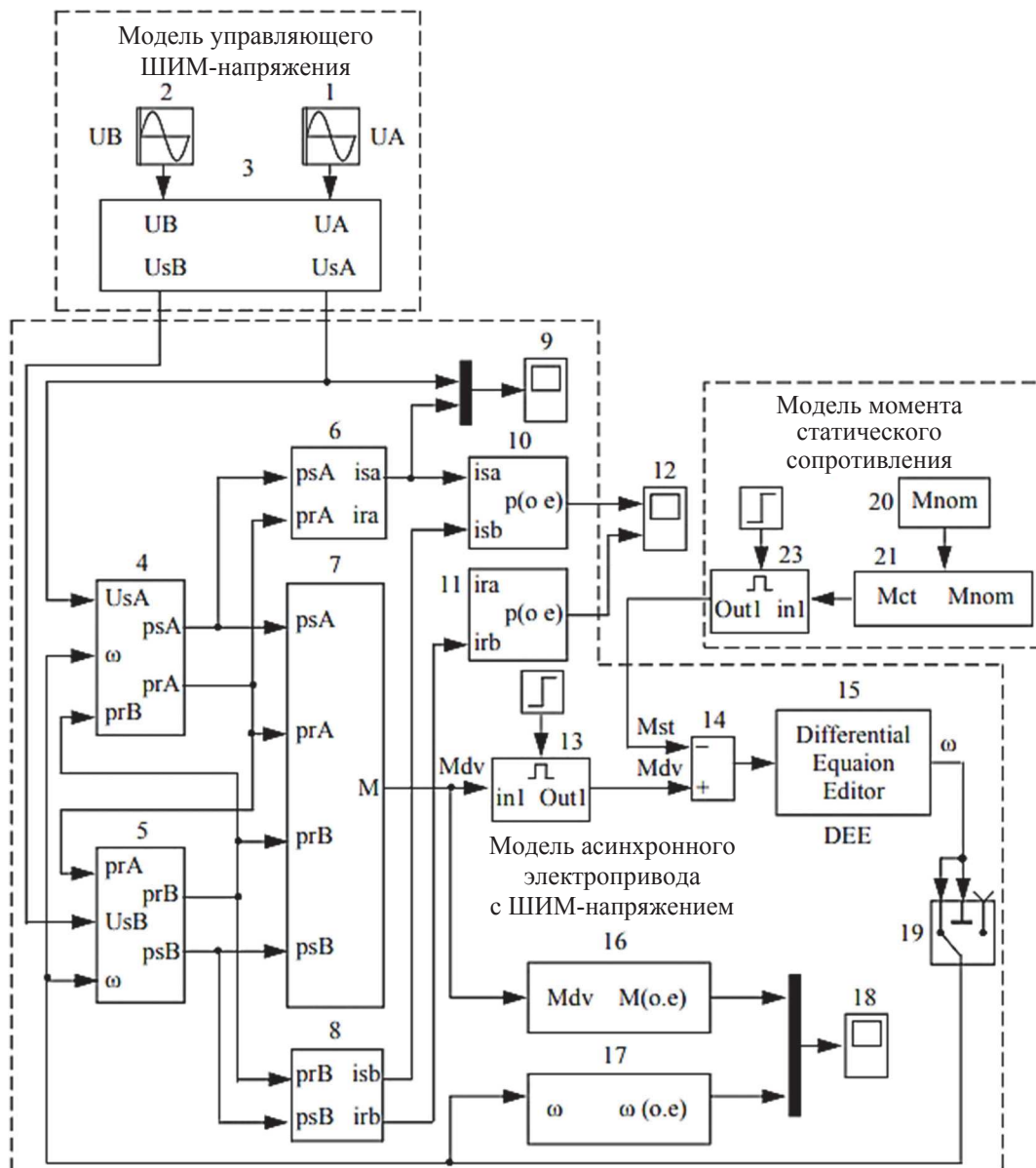


Рис. 3. Модель регулируемого электропривода в вычислительной среде *MathLab-Simulink*

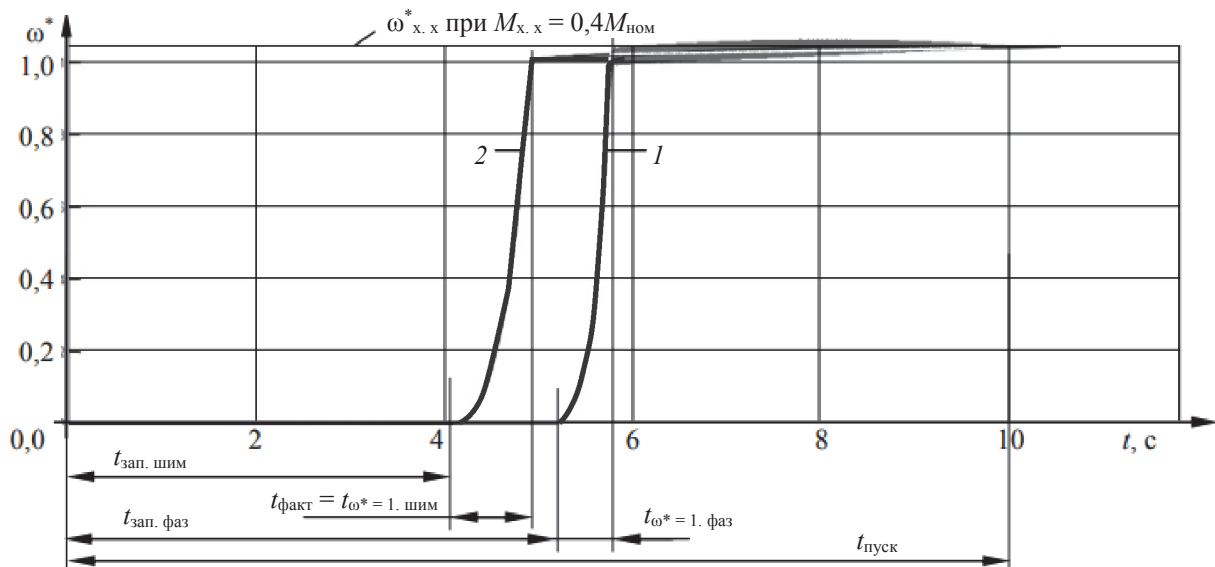


Рис. 4. Зависимости $\omega^* = f(t)$ при фазовом (1) и ШИМ-управлении (2)

Таким образом, в общем времени, заданном одним значением, существуют два отрезка времени. Исследованиями установлено, что фактически изменением действующего напряжения ПРН идет задание динамических механических характеристик электропривода, а не динамического момента двигателя, а он уже сам формируется значениями этих характеристик. И даже если после начала движения остановить изменение угла управления напряжением, то процесс увеличения скорости вращения вала двигателя продолжится, поскольку будет обеспечен формой механической характеристики, соответствующей значению действующего напряжения, задающегося ПРН. Такое состояние электропривода не зависит от заданного времени пуска. Поэтому скорость электропривода достигнет зоны установившегося значения раньше, чем закончится изменение действующего напряжения на выходе ПРН.

Заключение. При применении ПРН для обеспечения корректного с точки зрения необ-

ходимого пуска по критерию ускорения электропривода с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем следует задавать время запаздывания и время действительного пуска. Динамический процесс приведения в движение двигателя определяется и темпом нарастания действующего напряжения на его обмотках статора, и формой механической характеристики, соответствующей каждому значению этого изменяющегося напряжения. В результате в конце разгона в зоне «скольжений», не превышающих критические значения, характеристическая точка перемещается в области устойчивых отрезков механических характеристик. Анализ результатов проведенных наладочно-проверочных расчетов позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели физическому объекту в соответствии с заданным технологическим циклом функционирования регулятора напряжения.

Список литературы

1. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. М.: Высш. школа, 1976. 479 с.
2. Электротехнический справочник: в 3 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, В. А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3. 616 с.
3. Устройства плавного пуска [Электронный ресурс]. URL: https://media.automation24.com/manual/en/38752095_Manual_SIRIUS_softstarter.pdf (дата обращения: 10.03.2021).
4. Шубенко В. А., Браславский И. Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия, 1972. 200 с.
5. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988. 167 с.
6. Фазовое регулирование [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 10.03.2021).
7. Беляев В. П., Давидович Л. М. Электромеханика. Электромеханическое преобразование при частотном управлении электрическими машинами. Минск: БГТУ, 2004. 123 с.
8. Способ широтно-импульсной модуляции выходного напряжения переменного тока: а. с. 764096 (СССР) / В. П. Беляев, Г. И. Гульков, В. Г. Сидоров.: заявл. 10.11.1978; опубл. 15.09.80 в Б. И. № 34. 8 с.
9. Беляев В. П. Электрооборудование полиграфических машин. Минск: БГТУ, 2012. 207 с.
10. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: https://euroec.by/assets/files/danfoss/Rukovodstvo_VLT_Soft_Starter_MCD_600.pdf (дата обращения: 10.03.2021).
11. Устройство плавного пуска для асинхронного двигателя [Электронный ресурс]. URL: <https://drives.ru/stati/ustrojstvo-plavnogo-puska-asinhronnogo-dvigatelya> (дата обращения: 10.03.2021).
12. Устройство плавного пуска и торможения. Руководство пользователя Altistart 22 [Электронный ресурс]. URL: <https://profsector.com/media/catalogs/55e83642bc4f3.pdf> (дата обращения: 10.03.2021).
13. Плавный пуск асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором [Электронный ресурс]. URL: <https://infoelectrik.ru/vybor-kommutacionnoj-apparatury-dlya-montazha/ustrojstvo-plavnogo-puska-asinhronnogo-dvigatelya.html> (дата обращения: 10.03.2021).
14. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М.: Энергоиздат, 1981. 184 с.
15. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
16. Способ пуска короткозамкнутого асинхронного электродвигателя с параметрическим управлением в статоре: пат. 10546 Респ. Беларусь. № а 20060721; заявл. 13.07.2006; опубл. 05.04.2008. Бюл. № 4. 17 с.

References

1. Venikov V. A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Theory of similarity and simulation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. 479 p. (In Russian).

2. *Elektrotekhnicheskiy spravochnik* [Electrotechnical reference] / ed. V. G. Gerasimov, P. G. Grudinskiy, V. A. Labuntsov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, vol. 3. 616 p. (In Russian).
3. Soft starters. Available at: <https://media.automation24.com/manual/en/38752095> Manual SIRIUS softstarter. pdf (accessed 10.03.2021) (In Russian).
4. Shubenko V. A., Braslavskiy I. Ya. *Tiristornyy asinkhronnyy elektroprivod s fazovym upravleniyem* [Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 200 p. (In Russian).
5. Braslavskiy I. Ya. *Asinkhronnyy poluprovodnikovyy elektroprivod s parametricheskim upravleniyem* [Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 167 p. (In Russian).
6. Phase regulation. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (accessed 10.03.2021) (In Russian).
7. Belyaev V. P., Davidovich L. M. *Elektromekhanika. Elektromekhanicheskoye preobrazovaniye pri chastotnom upravlenii elektricheskimi mashinami* [Electromechanics. Electromechanical transformation in the frequency control of electrical machines]. Minsk, BGTU Publ., 2004. 123 p. (In Russian).
8. Belyaev V. P., Gul'kov G. I., Sidorov V. G. Method of pulse-width modulation of the output voltage of alternating current. 764096, 1980, no. 34. 8 p. (In Russian).
9. Belyaev V. P. *Elektrooborudovaniye poligraficheskikh mashin* [Electrical equipment of printing machines]. Minsk, BGTU Publ., 2012. 207 p. (In Russian).
10. Manual. Available at: <https://euroec.by/assets/files/danfoss/> Manual VLT Soft Starter MCD 600.pdf (accessed 10.03.2021) (In Russian).
11. Soft starter for asynchronous motor. Available at: <https://drives.ru/stati/ustrojstvo-plavnogo-puska-asinhronnogo-dvigatelya> (accessed 10.03.2021) (In Russian).
12. Soft start and brake device. Manual. Altistart 22. Available at: <https://profsector.com/media/catalogs/55e83642bc4f3.pdf> (accessed 10.03.2021) (In Russian).
13. Soft start of an asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor. Available at: <https://infoelektrik.ru/vybor-kommutacionnoj-apparatyury-dlya-montazha/ustrojstvo-plavnogo-puska-asinhronnogo-dvigatelya.html> (accessed 10.03.2021) (In Russian).
14. Petrov L. P. *Upravleniye puskom i tormozheniyem asinkhronnykh dvigateley* [Control of starting and braking of asynchronous motors]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 184 p. (In Russian).
15. Chernykh I. V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ.; St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. (In Russian).
16. Belyaev V. P. Method of starting a short-circuited asynchronous electric motor with parametric control in the stator. Patent RB 10546 (In Russian).

Информация об авторах

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). Email: beliaev@belstu.by

Тимошенко Максим Александрович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). Email: tima.makc@yandex.by

Information about the authors

Belyayev Valeriy Pavlovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: beliaev@belstu.by

Timoshenko Maksim Aleksandrovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: tima.makc@yandex.by

Поступила 30.12.2021