

# ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО И УПАКОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

## TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF PRINTING AND PACKING MANUFACTURES

---

УДК 621.376.54: 621.316.722

**В. П. Беляев**

Белорусский государственный технологический университет

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

В статье приводятся аспекты исследования пуска электропривода переменного тока с параметрическим управлением. Принято, что такое управление определяется фазовым изменением действующего напряжения переменного тока на обмотках статора электродвигателя. Осуществляется регулирование либо классическим способом, либо ШИМ-управлением. Основная цель – создание управляемого пуска, обеспечивающего выполнение электроприводом регламентных значений угловых и линейных ускорений механической части технологического оборудования для создания долгосрочной его эксплуатации. Отмечено, что с научной (теоретической) точки зрения оборудование, реализующее указанное управление, следует именовать как трехфазный полупроводниковый регулятор трехфазного напряжения переменного тока (ПРН). В то время как в производственной и коммерческой среде данное оборудование позиционируется как устройство плавного пуска, или *soft starter*, что не совсем логично. Показано, какие значения приобретает действующее напряжение переменного тока в функции угла управления им для классического фазового управления и на основе широтно-импульсной модуляции. Эти зависимости при прямо пропорциональном изменении значений угла управления однозначны и криволинейны. Поставлен вопрос получения прямолинейного нарастания действующего напряжения. Приводится математическое решение этой задачи. Выполнено моделирование процессов пуска при пропорциональном изменении угла управления действующим напряжением при ШИМ-управлении, прямо пропорциональном увеличении действующего напряжения при ШИМ-управлении и при классическом фазовом способе. Результаты показали, что различные закономерности изменения значений угла управления действующим напряжением не приносят существенных достоинств в процесс пуска электропривода, а добавляют сложности в реализацию системы управления ПРН или *soft starter*. Выявлено рациональное время введения функции байпас – прямое подсоединение обмоток статора АД к фазам питающей сети. Результаты исследований иллюстрируются необходимыми графиками, эпюрами, фазовыми портретами процесса пуска.

**Ключевые слова:** электропривод переменного тока, параметрическое управление, пуск электропривода.

**Для цитирования:** Беляев В. П. Исследование пуска асинхронного электропривода с параметрическим управлением // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2024. № 2 (285). С. 5–12.  
DOI: 10.52065/2520-6729-2024-285-1.

**V. P. Belyaev**

Belarusian State Technological University

### ASYNCHRONOUS START-UP STUDY ELECTRIC DRIVE WITH PARAMETRIC CONTROL

The article presents aspects of the study of the start of an AC electric drive with parametric control. It is assumed that such control is determined by the phase change of the effective AC voltage on the stator

windings of the electric motor. The control is carried out either in the classical way or by PWM control. The main goal is to create a controlled start-up that ensures that the electric drive fulfils the standard values of angular and linear accelerations of the mechanical part of the process equipment to create its long-term operation. It is indicated that from a scientific (theoretical) point of view, the equipment implementing this control should be referred to as a three-phase semiconductor regulator of three-phase alternating current voltage (SRV). At the same time, in the production and commercial environment, it is positioned as a soft starter device, which is not entirely logical. It is shown what values the effective AC voltage acquires in the function of its control angle for classical phase control and on the basis of pulse-width modulation. These dependencies are unambiguous and curvilinear with a directly proportional change in the values of the control angle. The problem of obtaining a rectilinear increasing acting voltage is raised. A mathematical solution to this problem is given. Simulation of start-up processes with a proportional change in the angle of control of the acting voltage under PWM control, directly proportional to the increase in the effective voltage under PWM control and with the classical phase method is carried out. The results showed that various regularities of changing the values of the operating voltage control angle do not bring significant advantages to the process of starting an electric drive, but add complexity to the implementation of the PRN or soft starter control system. A rational time for the introduction of the bypass function – direct connection of the stator windings of the AD stator to the phases of the supply network – has been revealed. The results of the research are illustrated by the necessary graphs, diagrams, and phase portraits of the launch process.

**Keywords:** AC electric drive, parametric control, starting the electric drive.

**For citation:** Belyaev V. P. Asynchronous start-up study electric drive with parametric control. *Proceedings of BSTU, series 4, Print- and Mediatechnologies*, 2024, no. 2 (285), pp. 5–12 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6729-2024-285-1.

**Введение.** Полиграфические машины для получения продукции оборудуются электромеханическими системами, в том числе нерегулируемыми и регулируемыми асинхронными электроприводами. Создание долгосрочной эксплуатации механической части технологического оборудования обеспечивается также выполнением электроприводом регламентных значений угловых и линейных ускорений в динамических процессах [1]. Несоблюдение этих требований приводят к тому, что электромеханические моменты колебательного характера негативно воздействуют на кинематику, имеющую люфты и зазоры, и приводят ее к преждевременному износу. Поэтому предлагается формировать процессы пуска и торможения регулируемым электроприводом, управляемым по критерию ускорения. В частности, для асинхронного электропривода указанные условия разгона обеспечиваются параметрическим управлением приводного электродвигателя (ЭД) [2]. Это управление связано с фазовым изменением действующего напряжения переменного тока на обмотках статора ЭД и выполняется либо классическим способом [3], либо ШИМ-управлением [4]. Ускорение нарастания действующего напряжения и форма механической характеристики ЭД, соответствующей каждому значению этого изменяющегося напряжения, определяют динамический процесс приведения в движение технологической машины (ТМ). Здесь уместно обратить внимание на то, как разъясняется в инструкциях по эксплуатации устройств плавного пуска (УПП) задание выполнения этого

пуска. Указывается, что следует задавать время увеличения на выходе полупроводникового преобразователя действующего напряжения, прикладываемого к обмоткам статора ЭД (рис. 1) [5, 6].

Однако вращение ротора ЭД в составе электропривода обуславливается уравнением движения, согласно которому на основе указанного действующего напряжения и соответствующей ему формы механической характеристики ЭД создается динамический момент, приводящий во вращение ротор ЭД с соответствующим ускорением, обусловленным параметрами электропривода, в частности его суммарным приведенным моментом инерции.



Рис. 1. Диаграммы изменения напряжения управления УПП

Современным оборудованием, реализующим указанное управление, выступает трехфазный полупроводниковый регулятор трехфазного напряжения переменного тока (ПРН), именуемый в производственной и коммерческой среде устройством плавного пуска или *soft starter* [5]. Как указывалось в источнике [7], не все так справедливо в достижении результатов

данного управления. Теоретическими основами электротехники действующее (эффективное) значение синусоидального напряжения переменного тока позиционируется как интегральный показатель и вычисляется по формуле [8]

$$u_{\text{действ}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t u^2(t) dt},$$

где  $u(t) = U_{\text{max}} \sin \omega t$ ;  $T = 0,01$  с – период интегрирования при частоте напряжения  $f = 50$  Гц;  $0 \dots t$  – пределы интегрирования.

Рассмотрим значения, которые приобретает действующее напряжение в функции угла управления при каком-либо законе его изменения от нулевого до максимального значения. Исследование этого вопроса в среде *MathCad* для классического фазового управления синусоидальным напряжением и на основе широтно-импульсной модуляции показало, что данные зависимости при прямо пропорциональном изменении значений угла управления **однозначны и криволинейны** (рис. 2).

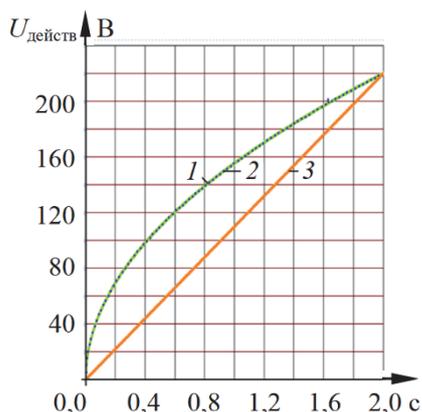


Рис. 2. Значения действующего напряжения при изменении угла управления им

Здесь изображены: значения действующего напряжения при фазовом управлении – 1; при ШИМ-управлении – 2 и желаемые изменения – 3 (прямолинейно нарастающие). Двум первым присуще достаточно интенсивное нарастание значений на начальных этапах увеличения угла управления с последующим уменьшением нарастания в конце переходного процесса. Известно, что если электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем, пропорционален квадрату действующего напряжения, то и скоростная характеристика электропривода  $\omega_{\text{дв}} = f(t)$  согласно уравнению движения будет соответствовать этим тенденциям.

Возникает интерес к определению закономерности изменения фазового угла управления напряжением для получения желаемого изменения действующего напряжения и его использо-

вания при параметрическом управлении электроприводом.

**Основная часть.** Обозначенную задачу решаем для ШИМ-управления, при котором полупериод широтно-импульсного напряжения формируется из трех импульсов  $m = 3$ . Выражение действующего напряжения в этом случае запишется так:

$$u_{\text{действ}}(n) = \sqrt{\frac{1}{0,01} \cdot \left( \int_{A1-nh}^{A1+nh} u^2(t) dt + \int_{A2-nh}^{A2+nh} u^2(t) dt + \int_{A3-nh}^{A3+nh} u^2(t) dt \right)}, \quad (1)$$

где  $A1, A2, A3$  – центры расположения импульсов;  $n$  – количество периодов повторяемости за время пуска;  $h$  – желаемое значение шага изменения угла управления.

Для  $m = 3$  координаты центров расположения импульсов на всех полупериодах напряжения ШИМ-управления (периоды повторяемости) за время пуска вычисляются следующим образом:

$$A_1 = 1A_1 = \frac{1 \cdot 0,01}{2 \cdot 3} = 0,001667 \text{ с};$$

$$A_2 = 3A_1 = \frac{3 \cdot 0,01}{2 \cdot 3} = 0,005 \text{ с};$$

$$A_3 = 5A_1 = \frac{5 \cdot 0,01}{2 \cdot 3} = 0,008333 \text{ с}.$$

Освободимся от корня в выражении (1) и для упрощения записи проведем следующие замены переменных:  $B1 = A1 - n \cdot h$ ;  $B2 = A1 + n \cdot h$ ;  $B12 = 3A1 - n \cdot h$ ;  $B22 = 3A1 + n \cdot h$ ;  $B13 = 5A1 - n \cdot h$ ;  $B23 = 5A1 + n \cdot h$ ,  $\omega t = v$ . Отсюда  $t = v : \omega$ , а левая часть будет представлена так:  $0,01Z^2$ .

Следовательно, выражение (1) запишется в виде

$$0,01Z^2 = \int_{B1}^{B2} U_{\text{max}}^2 \sin^2 v d \frac{v}{\omega} + \int_{B12}^{B22} U_{\text{max}}^2 \sin^2 v d \frac{v}{\omega} + \int_{B13}^{B23} U_{\text{max}}^2 \sin^2 v d \frac{v}{\omega}. \quad (2)$$

Поскольку в правой части выражения (2) интегралы имеют одинаковую форму записи, дальнейшие преобразования, состоящие в вынесении  $U_{\text{max}}^2$  и  $\omega$  как констант за знак интеграла, проводятся для первого интеграла. Получаем

$$\frac{U_{\text{max}}^2}{\omega} \int_{B1}^{B2} \sin^2 v dv. \quad (3)$$

Освобождаемся от квадратичной синусоидальной функции в подынтегральном выражении, используя предлагаемые математические преобразования геометрических функций [9]. Имеем

$$\frac{U_{\max}^2}{\omega} \int_{B1}^{B2} \left( \frac{1}{2} - \frac{\cos 2v}{2} \right) dv,$$

или

$$\frac{U_{\max}^2}{\omega} \left( \frac{v}{2} \Big|_{B1}^{B2} - \frac{\sin 2v}{2} \cdot \frac{1}{2} \Big|_{B1}^{B2} \right). \quad (4)$$

Выполним обратную замену ( $v = \omega t$ ), подставку пределов интегрирования. После некоторых преобразований будем иметь

$$\frac{U_{\max}^2}{2\omega} \cdot [(2nh\omega) - [\sin(2A1\omega + 2nh\omega) - \sin(2A1\omega - 2nh\omega)]]. \quad (5)$$

Преобразуем разность синусных функций в предыдущем выражении в произведение косинусной и синусной функций и получим

$$2 \cos \left( \frac{2A1\omega + 2nh\omega + 2A1\omega - 2nh\omega}{2} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{2A1\omega + 2nh\omega - 2A1\omega + 2nh\omega}{2} \right),$$

или

$$2 \cos(2A1\omega) \cdot \sin(2nh\omega). \quad (6)$$

Теперь выражение (2) запишется так:

$$0,01Z^2 = \left[ \frac{U_{\max}^2}{2\omega} \left[ (2nh\omega) - \right. \right. \\ \left. \left. - 2 \cos(2A1\omega) \cdot \sin(2nh\omega) \right] \right] + \\ + \left[ \frac{U_{\max}^2}{2\omega} \left[ (2nh\omega) - 2 \cos(2A2\omega) \cdot \sin(2nh\omega) \right] \right] + \\ + \left[ \frac{U_{\max}^2}{2\omega} \left[ (2nh\omega) - 2 \cos(2A3\omega) \cdot \sin(2nh\omega) \right] \right]. \quad (7)$$

Дальнейшие преобразования приводят к следующему виду выражение (1) с учетом того, что  $A2 = 3A1$ , а  $A3 = 5A1$ :

$$0,01Z^2 = \frac{3U_{\max}^2}{\omega} \left[ (nh\omega) - [\sin(2nh\omega) \times \right. \\ \left. \times (-\cos(2A1\omega) - \cos(2 \cdot 3A1\omega) - \right. \\ \left. - \cos(2 \cdot 5A1\omega))] \right]. \quad (8)$$

Для временного упрощения заменим параметром  $D$  скобку с косинусоидальными функциями, поскольку они не зависят от шага управления действующим напряжением, и получим

уравнение, позволяющее определить зависимость этого шага, создающую линейное нарастание действующего напряжения в процессе пуска:

$$0,01Z^2 = \frac{3U_{\max}^2}{\omega} [(nh\omega) - \sin(2nh\omega) \cdot D]. \quad (9)$$

Расчеты параметра  $D$  в указанных пределах показали, что он равен нулю. Тогда предыдущее выражение будет выглядеть так:

$$0,01Z^2 = \frac{3U_{\max}^2}{\omega} (nh\omega). \quad (10)$$

Раскрывая выражение  $Z$  и проводя упрощения, получим закономерность значений шага фазового угла управления действующим напряжением:

$$h(n) = \frac{0,01 \cdot U_{\text{действ}}^2(n)}{3U_{\max}^2 \cdot n},$$

или

$$h(n) = \frac{0,01 \cdot \left( \frac{U_{\text{действ}}(n)}{U_{\max}} \right)^2}{3 \cdot n}. \quad (11)$$

Данная закономерность формируется желаемым изменением действующего напряжения за заданное время его увеличения от нулевого значения до номинального. В рассматриваемой процедуре управления указанное время определяет количество полупериодов действующего напряжения  $n$ , на которых происходит последовательное, с вычисленным по формуле (11) шагом, прямо пропорциональное увеличение его значений. В вычислении этого шага участвует и количество указанных полупериодов, создавая обратно пропорциональную зависимость. Результат данного вычисления приведен на рис. 3, (задается время изменения действующего напряжения в течение 5 с, что составляет  $n = 500$ ).

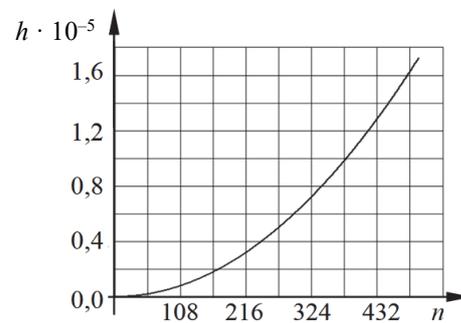


Рис. 3. Закономерность значений шага угла управления для прямо пропорционального увеличения действующего напряжения

Реализация предлагаемого алгоритма управления ПРН, очевидно, предусматривает разработку программного обеспечения, имеющего

некоторую сложность технического выполнения по сравнению с традиционным построением схемы указанной системы. Оценим приведенные рассуждения о закономерности значений шага фазового угла управления действующим напряжением результатами расчета пуска на разработанной модели в вычислительной среде *MatLab-Simulink* анализируемого электропривода [10, 11].

В ней на основе математического описания теорией обобщенной машины асинхронный электропривод спроектирован штатными и оригинальными блоками библиотеки *Simulink*. В модель заложен электродвигатель типоразмера АИР100L6У3, работающий в составе электропривода с моментом холостого хода  $M_{х. х} = 0,2M_{ном}$  и номинальными данными:  $P_{ном} = 2,2$  кВт;  $\omega_0 = 104,7$  рад/с;  $I_{ном} = 5,6$  А;  $s_{ном} = 6,5\%$ ;  $\cos\varphi = 0,76$ ;  $\eta_{ном} = 79,0\%$ ;  $J_{дв} = 0,02$  кг·м<sup>2</sup>;  $n_{ном} = 935$  об/мин;  $I_{п} / I_{ном} = 6,0$ ;  $M_{п} / M_{ном} = 2,1$  [12]. Результаты моделирования в виде эпюр  $\omega^* = f(t)$  при прямо пропорциональном изменении угла управления действующего напряжения при ШИМ-управлении 1, пропорциональном увеличении действующего напряжения при ШИМ-управлении 2 и при классическом фазовом способе 3 приведены на рис. 4.

Основной вывод состоит в том, что заданное время на увеличение действующего напряжения до номинального значения ( $t_{зад. пуск}$ ) используется для развития электромагнитного момента в двигателе до достижения им значения, превышающего момент сопротивления холостого хода электропривода  $M_{х. х}^*$  (момент статического сопротивления ТМ) ( $t_{зад}$  – время задержки), а также электромеханические процессы в нем, в результате которых осуществляется фактический пуск электропривода ( $t_{пуск}$ ) и получение заключительного отрезка времени ( $t_{зад. пуск} - t_{зад} - t_{пуск}$ ),

когда продолжающееся изменение действующего напряжения существенно не влияет на скоростную характеристику электропривода  $\omega^* = f(t)$ . Динамический момент в электромеханическом переходном процессе электропривода до момента достижения его скорости, соответствующей критическому «скольжению» асинхронного электродвигателя, увеличивается, а после перехода на устойчивую часть механической характеристики уменьшается. Таким образом, скоростная характеристика электропривода имеет два нелинейных участка с различной степенью изменения ускорения электропривода  $\varepsilon = d\omega_{дв} / dt$ . Определенную качественную оценку рассмотренного пуска можно проиллюстрировать фазовыми портретами при пуске, соответствующими зависимостям  $\beta - \omega^* = f(M^*)$  (рис. 5, 6).

Здесь 1 – естественная механическая характеристика АД, а 2 – характеристика АД в начале движения электропривода, когда  $M^* = M_{х. х}^*$ . Очевидно, что электромагнитный момент АД при ШИМ-управлении имеет меньшую амплитуду колебаний по сравнению с классическим фазовым управлением и более высокую их частоту.

Отметим, что амплитуда колебаний электромагнитного момента АД, происходящих в области устойчивых отрезков его механических характеристик, где их модуль жесткости отрицателен, при классическом фазовом управлении имеет достаточно большие отрицательные значения. Эти знакопеременные пусковые моменты негативно воздействуют на разветвленные кинематические схемы ТМ (например, полиграфических машин), увеличивая люфты и зазоры, тем самым ухудшая их техническое состояние. Особенно это просматривается у ТМ при большом количестве пусков в час.

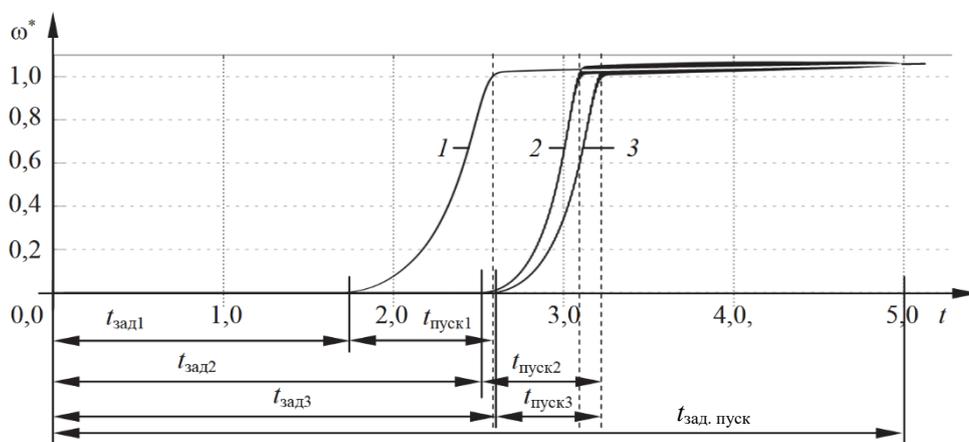


Рис. 4. Эпюры  $\omega^* = f(t)$  при различных законах изменения угла управления действующим напряжением

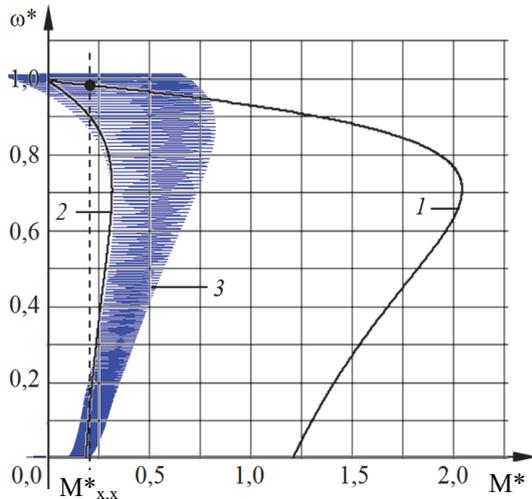


Рис. 5. Фазовый портрет пуска при ШИМ-управлении

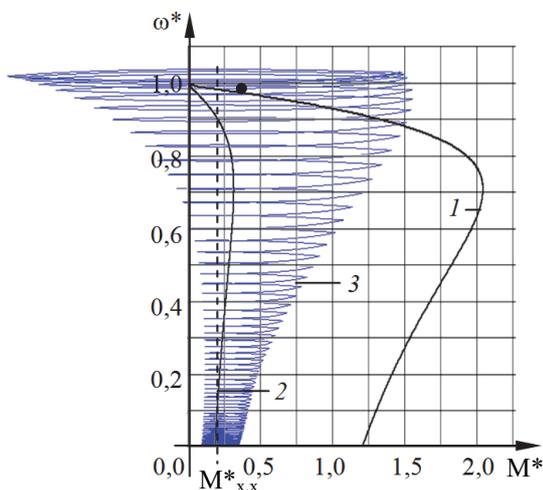


Рис. 6. Фазовый портрет пуска при классическом фазовом управлении

Аналитические рассуждения о процессах пуска подсказывают вывод о рациональной работе электропривода с ПРН или УПП – организовать в ней функцию байпас – прямое присоединение обмоток статора АД к фазам питающей сети. Штатно эта функция присутствует у многих серийно выпускаемых УПП. Следует

определиваться с моментом введения функции байпас. Он целесообразен, когда скорость ротора достигла первый раз номинального значения в конце времени  $t_{\text{пуск}}$  (рис. 4). Практически это можно определить наладочными работами или моделированием процессов пуска электропривода. Можно считать, что различные закономерности изменения значений угла управления действующим напряжением не приносят существенных достоинств в процесс пуска электропривода, а добавляют сложности в реализацию системы управления ПРН или УПП.

Приведенные выше рассуждения касались работы электропривода, где развиваемый ЭД электромагнитный момент преодолевает момент сопротивления ТМ, соответствующий нижеприведенному выражению при  $n = 1$ :

$$M_c = M_{x.x} + (M_{\text{ном}} - M_{x.x}) \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^n \text{sign}\omega, \quad (12)$$

где  $M_{x.x}$  – момент холостого хода электропривода;  $M_{\text{ном}}$  – номинальный момент сопротивления ТМ при  $\omega_{\text{ном}}$ ;  $\omega$  – текущее значение скорости;  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальное значение скорости ТМ;  $n$  – показатель степени;  $\text{sign}\omega$  – знак угловой скорости (направление вращения).

Однако принципиально ПРН (УПП) рекомендовались для ТМ, у которых упомянутый показатель степени равнялся 2 – так называемая «вентиляторная нагрузка электропривода». Про моделируем процесс пуска такой ТМ и приведем результат на рис. 7. При моделировании задавалось прямо пропорциональное изменение угла управления действующим напряжением. Эпюры скоростной характеристики электропривода  $\omega^* = f(t)$  и электромагнитного момента ЭД  $M^* = f(t)$  показывают, что и в этом случае заданное время на увеличение действующего напряжения до номинального значения ( $t_{\text{зад. пуск}}$ ) используется для создания электромагнитного момента в двигателе до достижения им значения, превышающего момент холостого хода электропривода – (момент сопротивления ТМ)  $M^*_{x.x}$  ( $t_{\text{зад}}$  – время задержки).

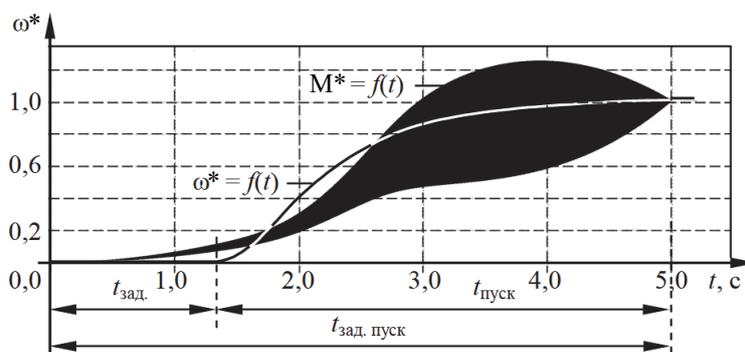


Рис. 7. Эпюры  $\omega^* = f(t)$  и  $M^* = f(t)$  при вентиляторной нагрузке электропривода

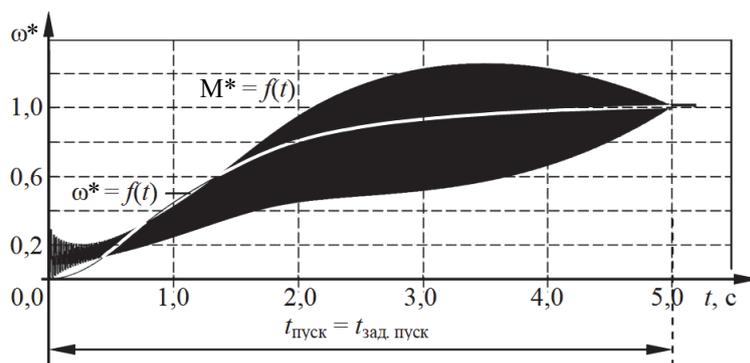


Рис. 8. Эшпоры  $\omega^* = f(t)$  и  $M^* = f(t)$  при вентиляторной нагрузке электропривода и  $t_{\text{пуск}} = t_{\text{зад. пуск}}$

Указанное время также используется на создание электромеханических процессов в электроприводе, в результате которых в рассматриваемом случае осуществляется пуск электропривода ( $t_{\text{пуск}}$ ) под воздействием изменения действующего напряжения до конца времени  $t_{\text{зад. пуск}}$ . Для сокращения времени задержки предлагается создать на выходе ПРН (УПП) определенное значение действующего напряжения, которому соответствует электромагнитный момент ЭД, равный моменту холостого хода электропривода. Значение этого действующего напряжения можно определить наладочными процедурами или вычислить согласно следующему выражению, позаимствованному из источника [11]:

$$|\bar{u}_{\text{нач}}| = \sqrt{\frac{2M_{\text{х. х}} R_s}{3a_{12} a_{21} \omega_s} \cdot \left[ (a_{11}^2 + \omega_s^2)(\delta_k^2 + \omega_s^2) + 2a_{12} a_{21} \omega_s^2 \right]}, \quad (13)$$

где  $|\bar{u}_{\text{нач}}|$  – модуль начального значения действующего напряжения, прикладываемого к обмоткам статора при трогании ротора;  $R_s$  – активное сопротивление обмоток статора;  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $\delta_k$  – параметры эквивалентной схемы асинхронного ЭД;  $\omega_s$  – угловая скорость магнитного поля статора. Проведем моделирование предлагаемого случая и отобразим результат на рис. 8. Он показывает, что при такой постановке управления дей-

ствующим напряжением за заданное время пуска совершится пуск электропривода. Некоторые современные УПП предусматривают предлагаемую процедуру пуска электропривода.

**Заключение.** С инженерной точки зрения система изменения угла управления действующим напряжением ПРН (УПП) должна реализовывать прямо пропорциональный закон. Коэффициент полезного действия процессов в асинхронном электродвигателе повышается при использовании функции байпас, вводимой в ПРН при первом достижении скорости ротора ЭД ее номинального значения. Всем производственным механизмам целесообразно организовывать управляемый по ускорению (интенсивности) разгон, обеспечивая в их кинематике безударное прохождение механического момента от вала электродвигателя. При применении ПРН для обеспечения корректного с точки зрения необходимого пуска по критерию ускорения электропривода с асинхронным короткозамкнутым ЭД следует задавать время запаздывания и время фактического пуска. Динамический процесс приведения в движение электропривода определяется и темпом нарастания действующего напряжения на обмотках статора ЭД, и формой механической характеристики, соответствующей каждому значению этого изменяющегося напряжения.

### Список литературы

1. Герасимов В. Г. Электротехнический справочник: в 3 т. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3. 616 с.
2. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М.: Энергоиздат, 1981. 184 с
3. Шубенко В. А., Браславский И. Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия, 1972. 200 с.
4. Способ широтно-импульсной модуляции выходного напряжения переменного тока: пат. RU 764096 / В. П. Беляев, В. Г. Сидоров, Г. И. Гульков. Оpubл. 10. 04. 1980.
5. Устройства серии PSR. Каталог. URL: <https://privod-in.ru/upload/iblock/df9/df97b4efd3d338b62d5f338aff1088ab.pdf> (дата обращения: 10.03.2024).
6. Устройство плавного пуска асинхронного двигателя. Каталог. URL: <https://evalar.by/ustroystvo-pлавного-puska-asinkhronnogo-dvigatelya> (дата обращения: 10.03.2024).
7. Беляев В. П. Об устройстве плавного пуска (About soft start). Полиграфия: технология, оборудование, материалы: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., Омск, 17–18 мая 2022 г. Омск, 2022. С. 13–21.

8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2016. 701 с.
9. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. М.: АСТ, 2021. 512 с.
10. Беляев В. П. Электрооборудование полиграфических машин. Минск: БГТУ, 2012. 207 с.
11. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
12. Электродвигатели АИР – технические характеристики. URL: <http://nasoselprom.ru/production> (дата обращения: 10.03.2024).

### References

1. Gerasimov V. G. *Elektrotekhnicheskiy spravochnik* [Electrotechnical reference]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. Vol. 3. 616 p. (In Russian).
2. 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).
3. 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).
4. Belyaev V. P., Sidorov V. G., Gulkov G. I. Pulse Width Modulation of AC Output Voltage. Patent RU 764096, 1980 (In Russian).
5. *Ustroystva serii PSR* [PSR Series]. Available at: <https://privod-in.ru/upload/iblock/df9/df97b4efd3d338b62d5f338aff1088ab.pdf> (accessed 10.03.2024) (In Russian).
6. *Ustroystvo plavnogo puska asinkhronnogo dvigatelya* [Induction Motor Soft Start Device]. Available at: <https://evalar.by/ustroystvo-plavnogo-puska-asinkhronnogo-dvigatelya> (accessed 10.03.2024) (In Russian).
7. Belyaev V. P. About the soft start. *Poligrafiya: tekhnologiya, oborudovaniye, materialy: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Printing: Technology, Equipment, Materials: materials of the XIII International scientific and practical conference]. Omsk, 2022, pp. 13–21 (In Russian).
8. Bessonov L. A. *Teoretichrskiy osnovy elektrotekhniki. Elektricheskiye tsepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 701 p. (In Russian).
9. Vygodskiy M. Y. *Spravochnik po elementarnoy matematike* [Handbook of Elementary Mathematics]. Moscow, AST Publ., 2021. 512 p. (In Russian).
10. Belyaev V. P. *Elektrooborudovaniye poligraficheskikh mashin* [Electrical equipment for printing machines]. Minsk, BGТУ Publ., 2012. 207 p. (In Russian).
11. Chernykh I. V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ.; SPb., Piter Publ., 2008. 288 p. (In Russian).
12. *Elektrodvigateli AIR – tekhnicheskkiye kharakteristiki* [AIR electric motors – technical characteristics]. Available at: <http://nasoselprom.ru/production> (accessed 10.03.2024) (In Russian).

### 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). Email: [beliaev@belstu.by](mailto:beliaev@belstu.by)

### Information about the author

**Belyaev Valeri Pavlovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University (220006, Minsk, Sverdlova st, 13a, Republic of Belarus). Email: [beliaev@belstu.by](mailto:beliaev@belstu.by)

Поступила 20.02.2024