

¹Белорусский государственный
технологический университет
г. Минск, Республика Беларусь

²Омский государственный
технический университет
г. Омск, Россия

ОБ УСТРОЙСТВЕ ПЛАВНОГО ПУСКА (ABOUT SOFT START)

В статье приведены результаты исследования пуска электропривода по системе «полупроводниковой регулятор напряжения — асинхронный электродвигатель». Изложена сущность получения динамического момента в этом процессе. Приведены рекомендации по настройке системы управления регулятора напряжения целесообразного пуска по критерию ускорения.

Ключевые слова: полиграфия, регулируемый электропривод, моделирование.

Ради научной справедливости устройство плавного пуска (УПП), которое рекламируется, следует называть трехфазным полупроводниковым регулятором трехфазного напряжения переменного тока (ПРН). Необходимо указать, что такой физической величины как плавность нет. Плавность — это бытовая интерпретация ускорения, с которым развивается процесс изменения физической величины, например, скорости, напряжения, механического усилия и т. п. ПРН используют для управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем, в основном для управляемого по времени пуска и торможения [1, 2], а также, в частности, для регулирования его скорости в диапазоне $D \leq 3...4$ [3]. Управление состоит в том, что на обмотки статора двигателя подается выходное трехфазное напряжение ПРН, значение действующего напряжения которого регулируется классическим фазовым способом, (рис. 1, а).

ПРН, двигатель, приводящий в движение технологическую машину — ТМ, представляют собой регулируемый электропривод. Эта система разомкнута по скорости. Из набора эксплуатационных

свойств (параметров), которыми ПРН обеспечивает регулируемый электропривод, остановимся на задании времени пуска (основная функция, которая рекламируется для применения ПРН). Анализ силовой схемы ПРН приводит к выводу, что выходное напряжение формируется управлением встречно - параллельно включенными тиристорами, симисторами или транзисторами (полупроводниковые ключи) в два или три фазных провода, соединяющих трехфазную сеть переменного тока с трехфазными обмотками статора двигателя. Формируется действующее напряжение переменного тока, значение которого плавно увеличивается / уменьшается изменением угла управления α (от максимального до минимального значения) полупроводниковыми ключами (рис. 1, б). Закон изменения угла управления в принципе может задаваться любым, однако технически рациональнее применить прямо пропорциональное его изменение. В любом случае следует определить зависимость изменения значений действующего напряжения за время полного его изменения. Поскольку действующее напряжение переменного тока позиционируется как интегральный показатель, то принципиально не имеет значения, изменяется угол α фазового управления переменным напряжением в соответствии с $\pi > \alpha > 0$ или $0 > \alpha > \pi$.

Возникает вопрос, какие значения имеет действующее напряжение в функции угла управления α при каком-либо законе его изменения от нулевого до максимального значения (время пуска)?

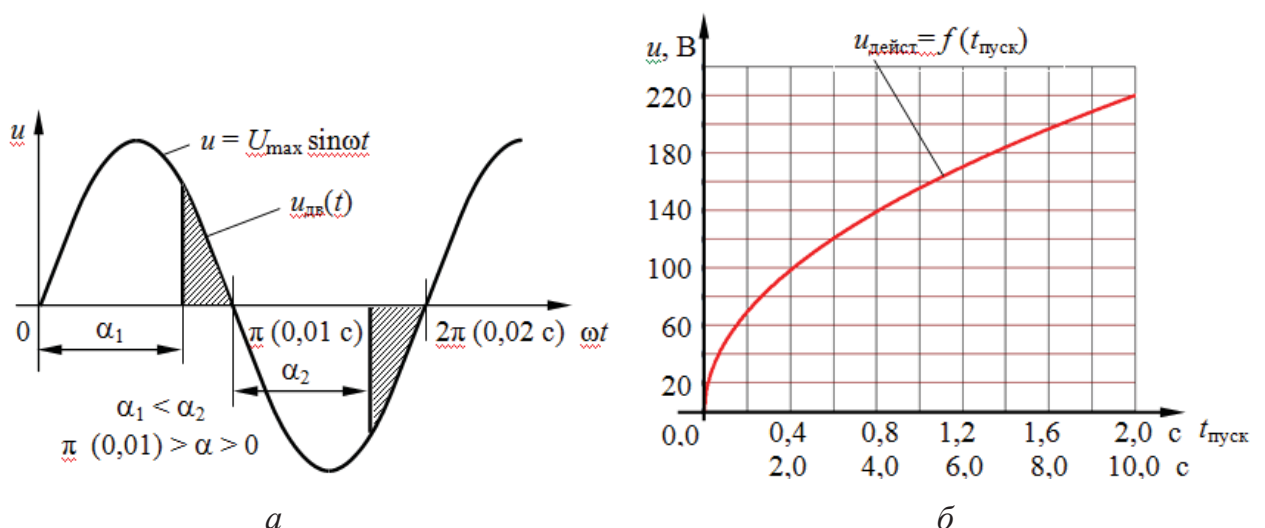


Рис. 1. Фазовое регулирование напряжения и его зависимость действующего напряжения в функции времени пуска

Одним из ответов на этот вопрос – результат, представленный на рисунке 1, б, проведенного исследования этой величины в среде *Mathcad* для классического фазового управления синусоидальным напряжением по общеизвестному выражению

$$u_{\text{дейст}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t (U(t))^2 dt}$$

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

Анализ, приведенной на рисунке 1, б зависимости $u_{\text{дейст}} = f(t_{\text{пуск}})$ для времени $t_{\text{пуск}} = 2$ с и $t_{\text{пуск}} = 10$ с, приводит к заключению, что при прямо пропорциональном изменении значений угла управления она **криволинейна и не зависит от времени пуска**. Ей присуще достаточно интенсивное нарастание значений на начальных этапах увеличения угла управления с последующим уменьшением нарастания в конце переходного процесса. И этот процесс не зависит от времени пуска. А поскольку электромагнитный момент пропорционален квадрату напряжения, то и скоростная характеристика электропривода $\omega = f(t)$ согласно уравнению движения будет соответствовать этим тенденциям. Следует напомнить, что при прямой подаче напряжения на обмотки статора электродвигателя, находящегося в составе электропривода, начинают развиваться в нем электромагнитные переходные процессы (первый этап процесса пуска, обозначим как время запаздывания движения $t_{\text{зап}}$), а при достижении его механическим моментом значения равного моменту статического сопротивления ТМ ($M_{\text{ДВ}} > M_{\text{ст}}$), возникают электро-механические процессы в электроприводе (второй этап процесса пуска). То есть, в ТМ, находящейся в состоянии покоя, на первом этапе через ее кинематику начнет действовать интенсивно нарастающий механический момент, приводящий в движение ТМ с соответствующим ускорением. При увеличении этого механического момента создаются условия перемещения валом двигателя кинематических звеньев привода ТМ и устранение в них люфтов и зазоров, создавая силовое «натяжение» в кинематических звеньях, не приводящие 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) ТМ. Значение напряжения, соответствующее варианту холостого хода, вычисляется по выражению:

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

где $|\bar{u}_{\text{нач}}|$ – модуль начального значения напряжения, прикладываемого к обмоткам статора при трогании ротора [4].

В инструкциях ПРН различных производителей указывается возможность задания различного времени пуска одним значением [например, 2]. Для исследования рассматриваемого вопроса (процесса пуска) разработана оригинальная модель такого электропривода в среде *Mathlab – Simulink* [4]. Модель обобщенного характера. В ней можно задать классический фазовый способ изменения напряжения (рис. 1, а) и ШИМ–управление по [5], а также различные законы изменения угла управления напряжением на выходе ПРН и значения нагрузки ТМ. Математическая модель асинхронного электродвигателя разработана на основе теории обобщенной машины.

При пуске сначала развиваются электромагнитные переходные процессы в двигателе (время запаздывания начала движения), а после начала движения электромеханические процессы в электроприводе (этап изменения скорости двигателя). Таким образом, в общем – то, во времени, заданным одним значением, существуют два отрезка. Исследованием установлено, что фактически изменением действующего напряжения на обмотках статора электродвигателя идет задание динамических механических характеристик электропривода, а не динамического момента двигателя, а он уже сам формируется значениями этих характеристик. На рисунке 2 представлен один результат расчета для наглядного объяснения рассматриваемого процесса пуска. Полученная механическая характеристика 1 в при $\omega = 0$ имеет условие $M_{\text{дв}}^* = M_{\text{ст.ТМ}}^*$, которое может создать движение электропривода с динамическим моментом $M_{\text{дин}}^*$, изменяющимся по значению, определяемой формой этой характеристики. В дальнейшем, при увеличении действующего напряжения ($U_{\text{дейст1}} < U_{\text{дейст2}} < U_{\text{дейст3}}$) будут создаваться механические характеристики, формирующие нарастающий динамический момент ($M_{\text{дин1}}^* < M_{\text{дин2}}^* < M_{\text{дин3}}^*$), обеспечивающий согласно уравнению

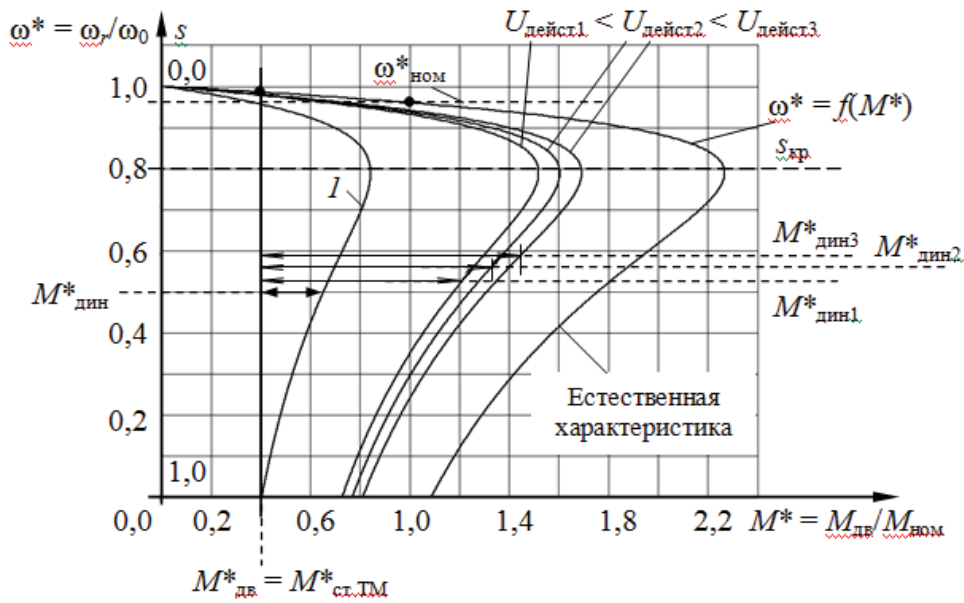


Рис. 2. Механические характеристики, демонстрирующие процесс пуска электропривода

нию движения электропривода ускорение ТМ. Этот процесс продолжается до зоны критического «скольжения» $s_{кр}$, после которой динамический момент будет уменьшаться, снижая ускорение электропривода.

Таким образом, при прямо пропорциональном изменении угла управления ПРН или при любом другом законе изменения действующего напряжения электродвигателя вращение электропривода не обеспечивает постоянное значение ускорения ТМ. И даже, если после начала движения, остановить изменение угла управления напряжением, то процесс увеличения скорости вращения электропривода продолжится, поскольку будет обеспечен формой механической характеристики двигателя, 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. Эта ситуация подсказывает, что нет необходимости в продолжение изменения угла управления напряжением, а целесообразнее выполнить преждевременное подключение обмоток статора двигателя напрямую к входному напряжению ПРН (функция байпас (bypass)) [6]. При применении ПРН для обеспечения корректного с точки зрения необходимого пуска по критерию ускорения электропривода с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем следует задавать

время запаздывания и время фактического пуска. Динамический процесс приведения в движение ТМ определяется и темпом (ускорением) нарастания действующего напряжения на его обмотках статора и формой механической характеристики, соответствующей каждому значению этого изменяющегося напряжения. В результате этого в конце разгона в зоне «скольжений», не превышающих критические значения $s_{кр}$, характеристическая точка перемещается в области устойчивых отрезков механических характеристик. Необходимо обратить внимание при пуске электропривода на задание начального значения напряжения, прикладываемого к обмоткам статора электродвигателя для организации корректного пуска электропривода ТМ. Здесь, как известно, существует несколько вариантов:

– задание **начального** значения угла управления ПРН, создающего напряжение, при котором возникает на валу электродвигателя механический момент, равный моменту холостого хода ТМ, после чего начинается процесс ее движения;

– задание **увеличения** угла управления ПРН за какое-то время от нулевого до значения угла, создающего напряжение, при котором возникает на валу электродвигателя механический момент, равный моменту холостого хода ТМ, после чего начинается процесс ее движения также с увеличения напряжения;

– задание угла управления ПРН равного углу, создающему номинальное напряжение на обмотках статора двигателя на непродолжительное время с последующим релейным уменьшением его до задания угла, создающего напряжение, при котором механический момент двигателя равен моменту холостого хода ТМ, после чего начинается процесс ее движения также с увеличения напряжения.

Несмотря на различные технологии изменения напряжения на выходе ПРН оно, в первый момент, прикладываясь к обмоткам статора двигателя, вызывает в них электромагнитные переходные процессы, возникновение электромагнитного момента, механического момента на его валу. Проведена серия расчетов процессов рассматриваемого электропривода со способами формирования действующего напряжения по рисунку 1, а и [5], различным заданием угла управления ПРН, моментом статического сопротивления ТМ с точки зрения оценки фактического времени пуска электропривода. На рисунке 3 приведен один из результатов расчета режима технологического цикла двухкрасочной офсетной печатной машины, приводимой в движение асинхронным двигателем типоразмера 4А80В2У3 ($P_{ном} = 2,2$ кВт;

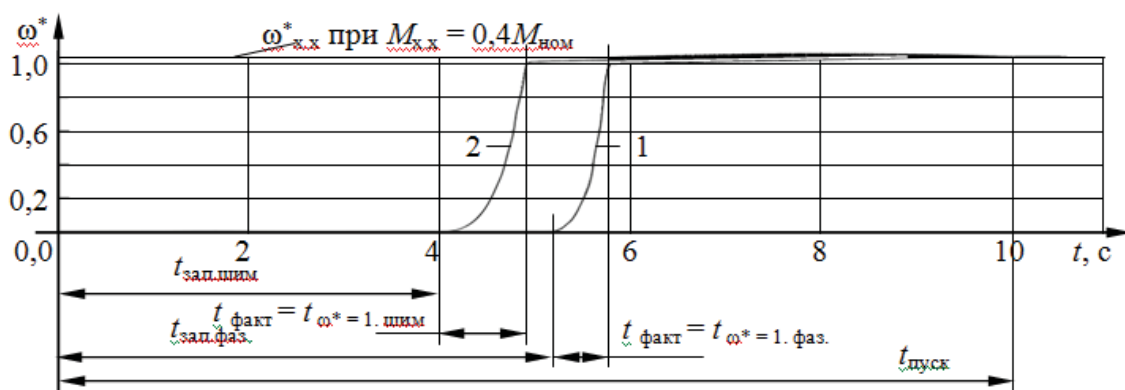


Рис. 3. Зависимости $\omega^* = f(t)$ при фазовом (1) и при ШИМ – управлении (2).

$U_{\text{ном.ф}} = 220$ В; $\omega_{\text{ном}} = 300,5$ рад/с). При этом задано прямо пропорциональное изменение угла управления ПРН – $t_{\text{пуск}} = 10$ с. с моментом статического сопротивления ТМ $M_{\text{к.х}} = 0,4M_{\text{ном}}$. Анализ результатов (рис. 3) позволяет установить, что время развития электромагнитных процессов в двигателе при классическом фазовом управлении действующим напряжением несколько больше, чем при предлагаемом ШИМ – управлении $t_{\text{зап.фаз.}} > t_{\text{зап.шим}}$, а время фактического разгона электропривода несколько больше при ШИМ – управлении, чем при классическом фазовом $t_{\text{факт}} = t_{\omega^* = 1. \text{шим}} > t_{\text{факт}} = t_{\omega^* = 1. \text{фаз.}}$

Закключение. При применении ПРН для обеспечения корректного с точки зрения необходимого пуска по критерию ускорения электропривода с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем следует задавать время запаздывания и время фактического пуска. Динамический процесс приведения в движение электропривода определяется и темпом нарастания действующего напряжения на обмотках статора двигателя 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 и рациональнее в работе ПРН организовать функцию байпас.

Библиографический список

1. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М.: Энергоиздат, 1981. 184 с.
2. Устройство плавного пуска и торможения. Руководство пользователя

Altistart 22. URL: <https://profsector.com/media/catalogs/55e83642bc4f3.pdf> (дата обращения: 10.02.2022).

3. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988. 167 с.

4. Беяев В. П. Электрооборудование полиграфических машин. Минск: БГТУ, 2012. 207 с.

5. А. с. 764096 СССР, МПК Н 02 Р 13/18. Способ широтно - импульсной модуляции выходного напряжения переменного тока / Беяев В. П., Гульков Г. И., Сидоров В. Г. № 2684826/24 – 07; заявл. 10.11.1978; опубл. 15.09.1980, Бюл. № 34. 8 с.

6. Пат. № 10546 Республика Беларусь, МПК Н 02 К 17/16, Н 02 Р 7/42, Н 02 Р 1/26. Способ пуска короткозамкнутого асинхронного электродвигателя с параметрическим управлением в статоре / Анкуда Д. А., Беяев В. П. № а20060721; заявл. 13.07.2006; опубл. 30.04.2008, Бюл. № 4. 17 с.

Беяев Валерий Павлович, кандидат технических наук, доцент (Беларусь), доцент кафедры «Полиграфическое оборудование и системы обработки информации» Белорусского государственного технологического университета
Адрес для переписки: beliaev@belstu.by

Филенко Наталья Ивановна, инженер кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (SPIN-код 7806-6707).
Адрес для переписки: nifilenko@omgtu.tech

Статья поступила в редакцию: 31.01.2022 г.