

УДК 621.313.33:004

В. П. Беляев, В. В. Скакун

Белорусский государственный технологический университет

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье рассматривается анализ потерь мощности регулируемого асинхронного электропривода в процессах пуска, достигаемого параметрическим управлением ШИМ-напряжения. Представлена разработанная авторами оригинальная модель асинхронного электропривода в программной среде *Matlab-Simulink*. Модель асинхронной машины представлена дифференциальными уравнениями, описывающими ее поведение на основе теории обобщенной машины. Разработанная модель позволяет исследовать прямой пуск электропривода и другие алгоритмы его разгона, а именно при фазовом способе управления и широтно-импульсном формировании управляющего напряжения. Это реализуется использованием штатного блока *Signal Builder Simulink*. Модель отражает физическое состояние электропривода, заключающееся в том, что она решает электромагнитные процессы до момента возникновения движения ротора двигателя и продолжает решение динамики после начала движения с учетом его электромеханических процессов. Таким образом, модель представляет собою совокупность двух моделей: до начала движения и после его. Переход из одного состояния в другое выполняется блоком *Step* по результатам наладки модели. Выполнен сравнительный анализ качества управления электроприводом на основе эпюр потерь мощности $\Delta p^* = f(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{дв}}^* = f(t)$ и угловой скорости электродвигателя $\omega_{\text{дв}}^* = f(t)$.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, управляемый пуск, имитационная модель, ШИМ-напряжение.

V. P. Belyaev, V. V. Skakun

Belarusian State Technological University

DYNAMICS OF PROCESSES OF START-UP OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

The article deals with the analysis of capacity losses of the adjustable asynchronous electric drive in the processes of the start-up reached by parametric control of PWM-pressure. The original model of the asynchronous electric drive developed by the authors in program *Matlab-Simulink* environment is presented. The model of the asynchronous machine is presented by the differential equations describing its behavior on the basis of the theory of the generalized machine. The developed model allows to investigate direct start-up of the electric drive and other algorithms of its acceleration, namely at a phase way of control and pulse-width formation of operating pressure. It is realized by the use of regular block *Signal Builder Simulink*. The model shows a physical condition of the electric drive, meaning that it solves electromagnetic processes till the moment of movement of the engine rotor and continues the computational dynamics after starting of motion taking into account its electromechanical processes. Thus, the model represents itself a set of two models: prior to the beginning of movement and after it. Transition from one condition into another is carried out by *Step* block by the results of mode) adjustment. The comparative analysis of quality control is performed by the electric drive on the basis of distribution capacity loss $\Delta p^* = f(t)$, electromagnetic moment $M_{\text{eng}}^* = f(t)$ and angular rate of the electric motor $\omega_{\text{eng}}^* = f(t)$.

Key words: the asynchronous electric drive, operated start-up, imitating model, PWM-pressure.

Введение. Энергосберегающее оборудование, такое как преобразователь частоты, стабилизатор напряжения, регуляторы напряжения, направлено на снижение затрат ресурсов, что, в свою очередь, позволяет сэкономить финансовые средства. Согласно последним исследованиям, представленным в статье, электродвигатели используют 45% от мирового энергопотребления и 2/3 от промышленного потребления [1]. При пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ток статора больше номинального в 5–7 раз. Такие большие токи в статоре недопустимы по условиям дина-

мических усилий в обмотках и нагрева обмоток. В асинхронных двигателях могут возникать переходные режимы с большими бросками тока не только при подключении двигателя к сети, но и при его реверсе и торможении. В связи с этим большое значение имеет рациональный выбор пускорегулирующей аппаратуры [2]. С одной стороны, желательно, чтобы процессы пуска, торможения реверса и регулирования частоты вращения не сопровождались значительными потерями электроэнергии, так как это ведет к удорожанию эксплуатации электропривода. Но, с другой стороны,

желательно, чтобы стоимость пускорегулирующих устройств не была чрезвычайно высокой, что привело бы к росту капитальных вложений. Обычно эти требования находятся в противоречии. Например, применение тиристорных пускорегулирующих устройств обеспечивает наиболее экономичное протекание процессов пуска и регулирования двигателя, но стоимость этих устройств пока еще остается достаточно высокой. Поэтому при решении вопроса о целесообразности применения регуляторов напряжения следует обратиться к графику работы проектируемого электропривода. Если электропривод не подвержен частым пускам, то повышенные затраты на регуляторы напряжения либо другое дорогостоящее оборудование могут оказаться неоправданными, а расходы, связанные с потерями энергии, незначительными. И, наоборот, при интенсивной эксплуатации электропривода в переходных режимах, т. е. производится большое число включений в час (механизм подачи крышки в крышкоделательной машине, механизм резания в одноножевой резальной машине в автоматическом режиме), применение регуляторов напряжения становится целесообразным.

Энергосберегающие технологии сейчас являются наиболее актуальными. Важный вопрос энергосбережения – оценка и исследование переходных процессов, в частности моделирование электромеханических систем, используя программное обеспечение *Matlab 6.5* и его среду имитационного моделирования *Simulink*, что и будет проведено в данной работе.

Основная часть. Управляемый пуск с определенной интенсивностью нарастания управляющего воздействия (питающего напряжения) позволяет организовать энергосберегающий режим пусковых процессов. Основными способами получения качественных пусковых, регулировочных и тормозных свойств регулируемого электропривода переменного тока, сопоставимых с аналогичными свойствами регулируемого электропривода постоянного тока, являются частотный и параметрический способы управления. Частотный способ управления позволяет получить высококачественное регулирование, различные функциональные свойства асинхронного электропривода. Но это сопровождается достаточно сложными системами управления с использованием интеллектуальных полупроводниковых преобразователей. Параметрический способ управления имеет определенные ограничения по диапазону получения регулировочных характеристик, расширение которого приводит к увеличению габаритной мощности электродвигателя и, как

правило, к недоиспользованию этой мощности. Но в вопросах организации процессов пуска он является альтернативным частотному управлению. Известно, что одним из возможных способов регулирования координат асинхронного двигателя является изменение напряжения на обмотках статора. Управляющее воздействие в виде напряжения питания, прикладываемого к обмоткам статора, осуществляется изменением угла (фазы) включения силовых ключей в цепях присоединения обмоток статора к фазам питающей сети. Такой способ управления асинхронным электродвигателем представляет собой одну из разновидностей параметрического (амплитудного) регулирования. Он получил название фазового управления [3].

Формирование регулируемого напряжения на обмотках статора возможно различными приемами, в том числе и широтно-импульсным модулированием [4]. Рассмотрим вариант формирования напряжения на каждом полупериоде из пульсов, центры которых отстоят друг от друга на расстоянии π / m , где $m = 3, 6, 9, 12, \dots$ – целое число импульсов в полупериоде. Центр первого импульса располагается в точке $\pi / 2m$ от начала полупериода, положение фронтов каждого импульса изменяется в ту и другую сторону от центра импульса. Кроме того, количество пульсов на каждом полупериоде трехфазной системы напряжения выбирается из соотношения $n = 2mk \pm 1$, где $k = 1, 2, 3, 4, \dots$, а n – номер выбранной гармоники, которая должна присутствовать в промодулированном напряжении. Предложенный способ широтно-импульсной модуляции переменного напряжения осуществляет подавление определенных гармоник, чем улучшает гармонический состав питающего напряжения и тем самым энергетические показатели, а также позволяет сформировать симметричную трехфазную систему как для фазных, так и для линейных напряжений. Его применение расширяет функции асинхронного электропривода за счет изменения параметров энергии, подводимой к двигателю в установившихся и переходных режимах. Это повышает управляемость режимов электропривода при необходимых, заданных показателях качества регулирования.

Разработана универсальная модель для прямого пуска, фазового регулирования и ШИМ-регулирования, показанная на рис. 1. Модель представляет собою совокупность двух моделей: до начала движения и после его. Моделирование асинхронной машины выполняется при решении дифференциальных уравнений, описывающих поведение двигателя на основе теории обобщенной машины [3].

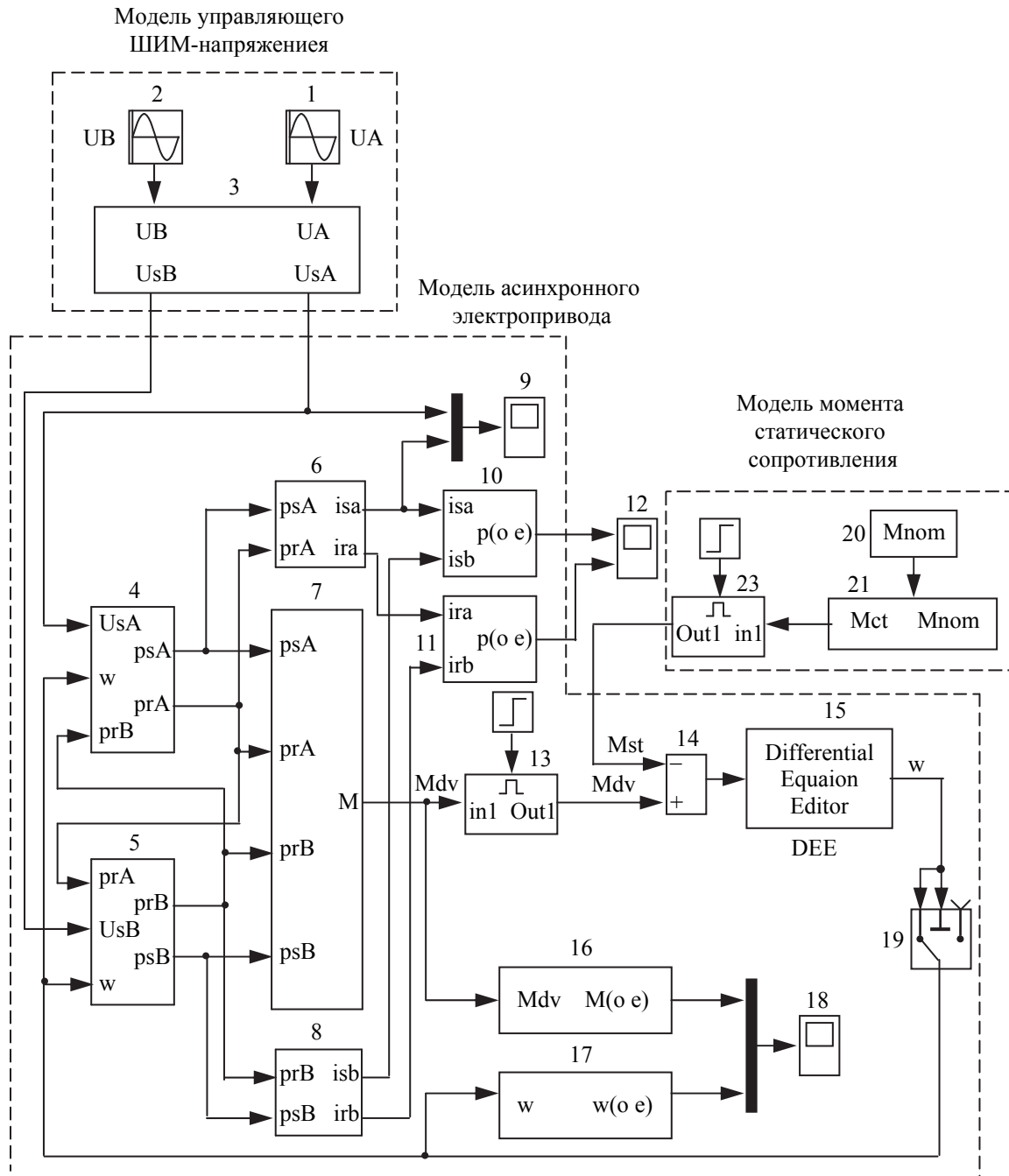


Рис. 1. Модель асинхронного электропривода с ШИМ-напряжением

В указанной литературе и в другой научно-технической литературе было выявлено, что при несинусоидальном и несимметричном напряжении, питающем обмотки статора асинхронного двигателя, наиболее рациональным является представление его режимов работы уравнениями, записанными в неподвижной системе координат $\alpha - \beta$. Потокосцепление обмоток статора и ротора в указанной системе координат определяется по следующим выражениям [3]:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{s\alpha} - a_{11}\psi_{s\alpha} + a_{12}\psi_{r\alpha}; \\
 \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= U_{s\beta} - a_{11}\psi_{s\beta} + a_{12}\psi_{r\beta}; \\
 \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= a_{21}\psi_{s\alpha} - a_{22}\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}\omega_r; \\
 \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= a_{21}\psi_{s\beta} - a_{22}\psi_{r\beta} + \psi_{r\alpha}\omega_r,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где коэффициенты, входящие в данные формулы, определяются по следующим выражениям:

$$a11 = \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a12 = \frac{R_s L_m}{L_s L_r - L_m^2}; \quad (2)$$

$$a21 = \frac{R_r L_m}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a22 = \frac{R_r L_s}{L_s L_r - L_m^2},$$

где R_s — активное сопротивление обмотки фазы статора; $L_s = L_{s\sigma} + L_m$ — полная эквивалентная индуктивность фазы статора, состоящая из индуктивности от поля рассеивания ($L_{s\sigma}$) и главного потока (L_m); $L_r = L_{r\sigma} + L_m$ — полная эквивалентная индуктивность фазы ротора, состоящая из индуктивности от поля рассеивания ($L_{r\sigma}$) и главного потока (L_m); R_r — активное сопротивление обмотки фазы ротора.

Уравнение электромагнитного момента, выраженное через потокосцепление обмоток, вычисляется по формуле

$$M_{дв} = \sqrt{3} p \frac{a12}{R_s} (\Psi_{sB} \Psi_{rA} - \Psi_{sA} \Psi_{rB}). \quad (3)$$

Уравнение движения электропривода запишется так:

$$M_{дв} - M_{ст} = J_{\Sigma пр} \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (4)$$

где $J_{\Sigma пр}$ — суммарный приведенный момент инерции электропривода.

Управляющие воздействия U_{sa} и U_{sb} представляются блоками 1 и 2. Решение приведенных выражений выполняется *Subsystems*-моделью, блоками 4, 5, 6, 8, 16. Например нахождение потокосцеплений статора и ротора обмотки фазы *A* выполняется блоком 4, аналогично построен блок 5 для вычисления потокосцеплений статора и ротора обмотки фазы *B*. Определение электромагнитного момента, развиваемого двигателем, осуществляется блоком 16. Решение уравнения движения электропривода имеет оригинальное оформление.

Сначала блоком 14 находится разница между моментом двигателя и моментом статического сопротивления механизма, а потом она поступает на процедуру дифференцирования блоком 15 (*Differential Equation Editor*) для получения значений скорости электропривода, что является конечным результатом вычисления модели. Команда на процедуру дифференцирования подается блоком 13 (*Step*). Момент подачи этой команды выбирается вручную по наладочному расчету и выявлению точки, в которой разница $M_{дв} - M_{ст}$ приблизительно равна нулю, а затем изменяется, создавая положительное изменение скорости электроприво-

да. Для анализа полученные результаты целесообразнее представлять в относительных единицах, в которых за базовые приняты номинальные значения этих физических величин. Визуализация результатов выполняется виртуальными осциллографами (*Scope*). Для придания модели обобщенности введем в нее *M*-файл, куда заносятся входные данные, используемые в модели, рис. 2.

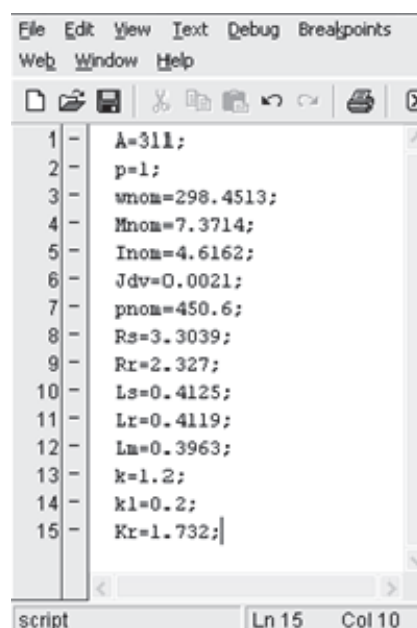


Рис. 2. Окно *M*-файла

Технологический цикл оборудования реализуется электроприводом посредством выполнения циклограммы задания управляющего напряжения в подсистеме *Signal Builder* (блок 1). В ней формируется желаемая диаграмма изменения угла управления напряжением, соответствующая этому циклу. Для поставленной задачи интерес представляет начальная часть желаемой диаграммы, т. е. нарастание управляющего напряжения (пуск электропривода). На рис. 3 представлены варианты развития этого напряжения в процессе пуска. Первая зависимость (линия 1) технически наиболее проще реализуемая, представляющая линейное изменение угла за время $t_{пуск}$. Вторая зависимость (линия 2) создает возможность организации форсированного развития электромагнитного момента двигателя $t_{форс2}$ за счет быстрого увеличения напряжения питания на обмотках электродвигателя до значения, равного моменту холостого хода электропривода с целью быстрого начала его движения. Временная и весовая координаты точки Б, с которой начинается линейное изменение угла за время $t_{пуск}$, определяются в процессе наладки модели, а ее действие задается в блоке 15 (*Step*).

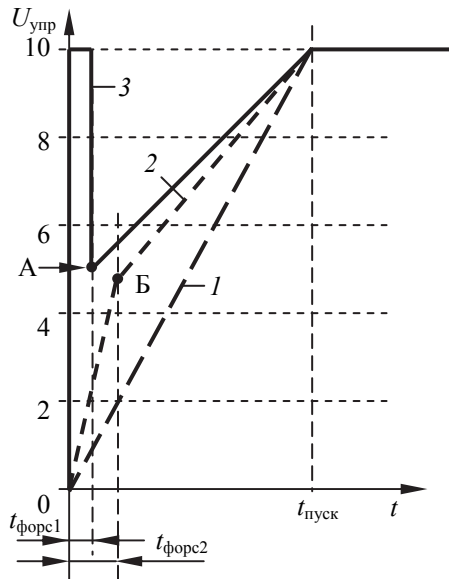


Рис. 3. Желаемые диаграммы изменения угла управляющего

Аналогично следует поступать и при наладке реального электропривода с регулятором напряжения. Третья зависимость (линия 3) организует форсированное развитие электромагнитного момента двигателя за счет подачи номи-

нального напряжения на время $t_{\text{форс1}}$ с той же целью, что и в предыдущем случае. Временная и весовая координаты точки А также определяют при наладке или модели, или электропривода.

На рис. 4, 5, приведены эпюры скорости и электромагнитного момента двигателя, а также суммарных потерь, полученных в результате расчета фазового регулирования, ШИМ-регулирования и прямого пуска режимов работы электропривода.

Следует обратить внимание на развитие скорости в рассматриваемых способах пуска. При прямом изменении скорости в основном подчиняется инерционности электропривода ($J_{\Sigma\text{пр}}$) и неконтролируемому развитию электромагнитного момента двигателя. Характеризуется этот процесс существенными колебаниями скорости в начале и незначительными в конце пуска. При применении управляемого по задающему воздействию (U_sA и U_sB) пуска колебания скорости отсутствуют в начальном этапе разгона электропривода и незначительно проявляются при выходе характерной точки, оценивающей положение электропривода на механических характеристиках асинхронного двигателя, на устойчивую их часть ($0 < s < s_{кр}$).

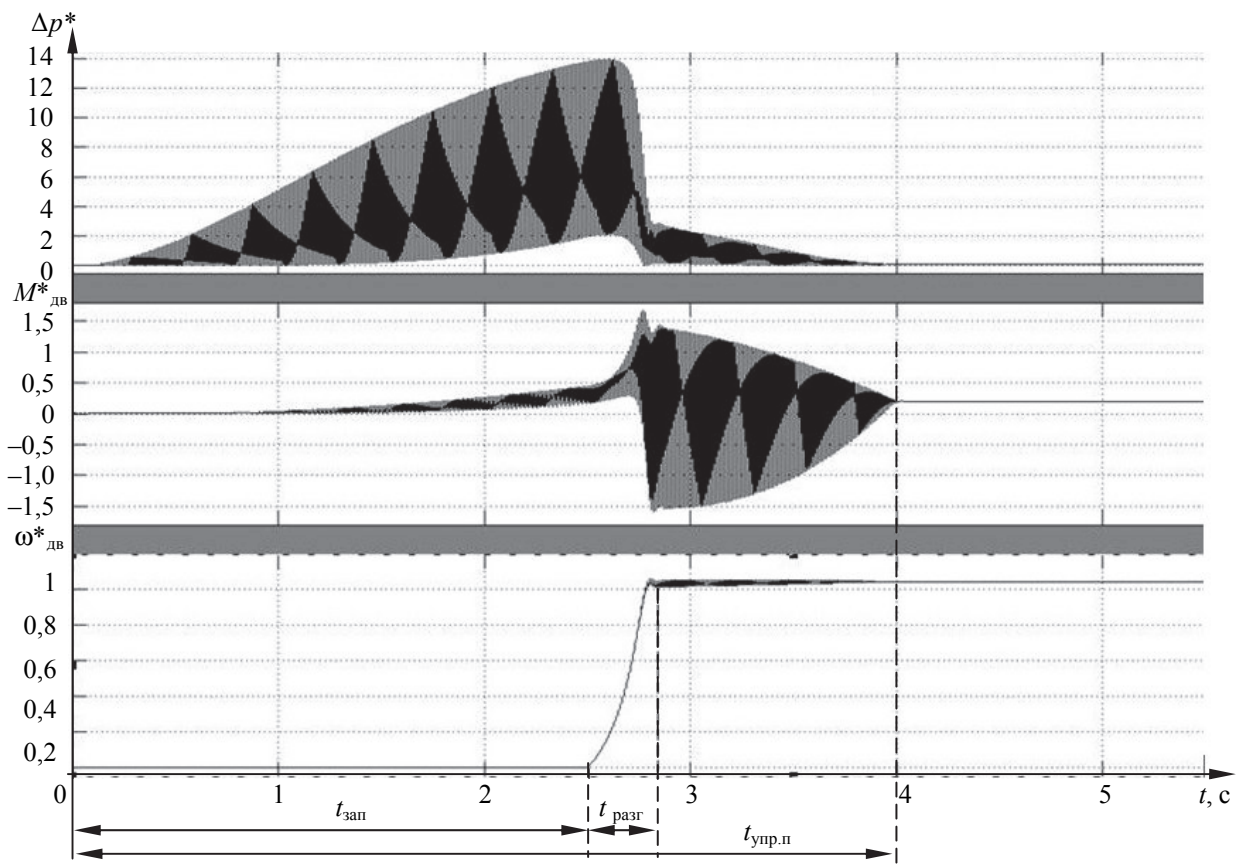


Рис. 4. Эпюры потерь мощности $\Delta p^* = f(t)$; электромагнитного момента $M^* = f(t)$; частоты вращения вала двигателя $\omega^* = f(t)$ при фазовом регулировании

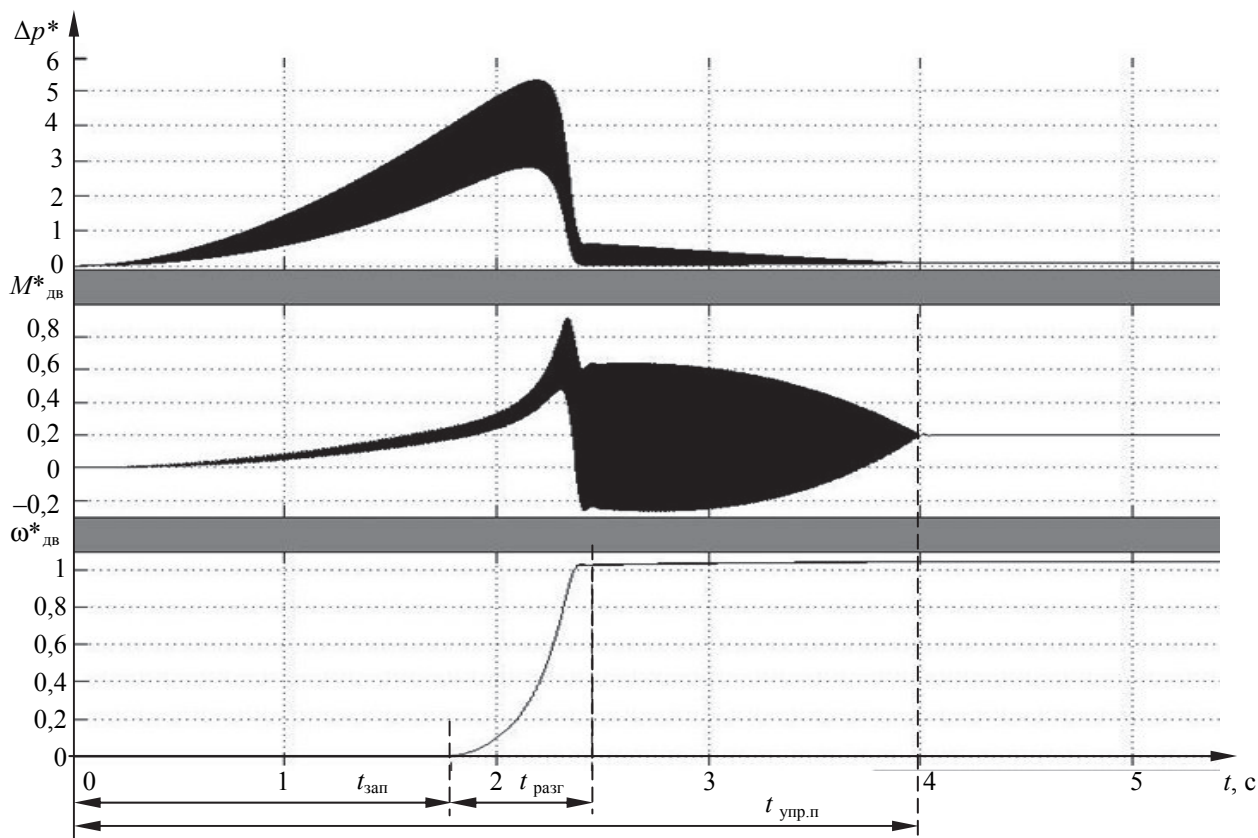


Рис. 5. Эпюры потерь мощности $\Delta p^* = f(t)$; электромагнитного момента $M^* = f(t)$; частоты вращения вала двигателя $\omega^* = f(t)$ при ШИМ-регулировании

Из управляемых по заданию пусках предпочтение следует отдать пуску с ШИМ-напряжением. Оно гарантирует наименьшие колебания скорости в процессе разгона, наименьшие потери мощности, наименьшие ускорения электропривода. Для фазового регулирования при данной форме задания угла изменения задающего воздействия, а именно повышение напряжения питания до номинального за 4 с, время запаздывания $t_{\text{зап}} = 2,5$ с, обусловленное нарастанием электромагнитного момента двигателя до значения момента холостого хода. Время разгона двигателя после этого момента $t_{\text{п.упр}} = 0,08$ с. Причем напряжение продолжает нарастать за счет его управления до номинального. Амплитуда колебаний момента двигателя составляет $A = 3$ о. е., период $T = 0,001$ с, частота колебаний $f = 1000$ Гц. Период высокочастотных колебаний не оказывает существенного влияния из-за инерционности привода рабочей машиной, которой является печатное оборудование, обладающее большими инерционными массами поступательного и вращательного движения. Амплитуда колебаний угловой скорости двигателя составляет $A = 0,033$ о. е. от номинального значения, период колебаний $T = 0,001$ с, частота колебаний $f = 1000$ Гц. Из полученных данных видно, что момент двигателя и его угловая

скорость находятся в противофазе. Относительные потери мощности в двигателе за время пуска превышают его номинальные значения, достигая максимальных значений, возникающих во время движения вала двигателя от нулевой скорости в зоне больших скольжений, превышающих критическое скольжение. Относительные потери мощности превышают номинальные потери в 4,89 раза. Интегральный показатель потерь за период изменения напряжения от нуля до номинальных составляет 9,797. В режиме с ШИМ-регулированием характер изменения момента соответствует задающему напряжению, которым питается электродвигатель. Колебания электромагнитного момента двигателя появляются в процессах пуска и обуславливаются применением ШИМ-напряжения. Во время управляемого пуска $t_{\text{п.упр}}$ момент имеет колебательный характер с высокочастотной составляющей, соответствующей частоте модуляции ШИМ-напряжения. В процессе пуска прослеживается интенсивное нарастание момента, связанное с тем, что регулировочные характеристики с изменением угла управления ШИМ-напряжением входят в зону значительных динамических моментов, приближаясь к естественной механической характеристике. Существенного влияния на развитие скорости эти колебания не оказывают,

поскольку они носят высокочастотный характер и фильтруются механической частью электропривода. Значительные потери в двигателе наблюдаются только во время $t_{\text{зап}} = 1,7$ с, когда ротор двигателя не вращается (режим короткого замыкания), время разгона двигателя составляет $t_{\text{п.упр}} = 0,6$ с. Амплитуда колебаний момента двигателя составляет $A = 0,84$ о. е., период колебаний $T = 0,0025$ с, частота колебаний $f = 400$ Гц. Амплитуда колебаний угловой скорости двигателя $A = 0,0045$ о. е., период колебаний $T = 0,0035$ с, частота колебаний $f = 1000$ Гц. После начала движения за счет увеличения угла управления ШИМ-напряжения потери находятся на уровне номинального значения и к концу пуска соответствуют потерям холостого хода. Относительные потери мощности в данном цикле работы достигают своего максимального значения 5,5 о. е. Интегральный показатель потерь за период изменения напряжения от 0 до номинальных составляет 4,198.

Заключение. На основе рассмотрения характера изменения электромагнитного момента для прямого пуска, фазового управления и ШИМ-регулируемого делаем вывод, что максималь-

ные значения момента при прямом пуске достигают трехкратных $M_{\text{ном}}$, при фазовом регулировании $1,6M_{\text{ном}}$, а при ШИМ-напряжении $0,86M_{\text{ном}}$, что говорит о влиянии их на состояние кинематических звеньев технологической машины. Большие динамические моменты увеличивают люфты и зазоры, нарушая тем самым работоспособность кинематики и ухудшая качество выполнения технологического процесса (печатающие, фальцевание и т. д.).

Рассмотрение потерь в данном случае позволяет сделать вывод, что общие потери при управляемом пуске несколько меньше потерь мощности при прямом пуске. При пуске с ШИМ-регулируемым происходит подавление высших гармоник питающего электродвигателя напряжения, улучшая гармонический состав питающего напряжения и тем самым энергетические показатели, а также позволяет сформировать симметричную трехфазную систему как для фазных, так и для линейных напряжений. Гармонический состав питающего асинхронный двигатель напряжения определяет форму механических характеристик, а следовательно, его регулировочные свойства и энергетические показатели.

Литература

1. <http://electroprivod.com/Page227.aspx>.
2. http://www.agrovodcom.ru/elektrodvigatel/info_jenergoberezhenie-jelektrodvigatelej.php.
3. Беляев В. П. Электрооборудование полиграфических машин. Минск, БГТУ, 2012. 207 с.
4. Беляев В. П., Давидович Л. М. Электромеханика. Электромеханическое преобразование при частотном управлении электрическими машинами. Минск, БГТУ, 2004. 82 с.

References

1. <http://electroprivod.com/Page227.aspx>.
2. http://www.agrovodcom.ru/elektrodvigatel/info_jenergoberezhenie-jelektrodvigatelej.php.
3. Belyaev V. P. *Elektrooborudovanie poligraficheskikh maschin* [Elektrooborudovanie of polygraphic cars]. Minsk, BGTU Publ, 2012. 207 p.
4. Belyaev V. P., Davidovich L. M. *Elektromehanika. Elektromechanicheskoe preobrazovanie pri chastotnom upravlenii elektricheskimi maschinami* [Elektromehanika. Electromechanical transformation at frequency management of electric cars]. Minsk, BGTU Publ, 2014. 82 p.

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).

Скакун Валентина Викторовна — магистрант кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь).

Information about the authors

Belyaev Valeri Pavlovich — Ph. D. Engineering, assistant professor, assistant professor of the Department of editing equipment and information processing systems, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

Skakun Valentina Viktorovna — undergraduate student of the Department of editing equipment and information processing systems, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).