

## АННОТАЦИЯ

В программе MATLAB-Simulink разработана модель асинхронного электропривода с ШИМ-управлением и упругими связями. Модель представлена в виде двухмассовой электромеханической системы. На модели исследуются электромагнитные переходные и установившиеся процессы в двигателе и электромеханические процессы в электроприводе при разных нагрузках и конечных значениях скорости механизма. Рассчитываются моменты упругих сил в ременных передачах. Результаты исследования режимов подтверждают адекватность разработанной модели.

## ANNOTATION

In program MATLAB-Simulink the model of the asynchronous electric drive with of PWM-control and elastic communications is developed. The model is presented in the form of two-mass electromechanical system. On model the electromagnetic transitive and established processes in the engine and electromechanical processes in the electric drive are investigated at different loadings and final values of speed of the mechanism. The moments of elastic forces in belt drives pay off. Results of research of modes confirm adequacy of the developed model.

## Моделирование асинхронного электропривода с ШИМ-управлением и упругими связями

В. П. Беляев, к. т. н., доцент, Белорусский государственный технологический университет

Во многих отраслях промышленности применяется достаточно обширный класс машин и механизмов, оснащённых электромеханическими системами с клиноременными передачами в кинематических цепях. В полиграфической промышленности к ним относятся листовые, ротационные, тигельные печатные и фальцевальные машины, насосы, компрессоры и др.; в текстильной — ткацкое оборудование, шлихтовальные машины и прочие установки; в деревообрабатывающей — пилорамы, деревообрабатывающие станки, вентиляционные установки и т. п. Клиновой ремень — это основной элемент таких передач. Он обладает определённой жёсткостью (модулем упругости), определяющей характер передачи механического момента от вала приводного двигателя к остальной кинематике машин. Оценка влияния этого физического свойства клинового ремня на равномерность движения исполнительных механизмов, выявление изменения упругости материала клинового ремня в процессе его эксплуатации целесообразны как при проектировании электроприводов для промышленного оборудования, так и при его использовании.

Наличие упругих связей в электроприводе переводит его в класс двухмассовых электромеханических

систем. Кинематическая схема такой системы приведена на рис. 1. Для использования разработанной в программе MATLAB-Simulink модели регулируемого электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем и параметрическим управлением [1] в исследованиях как системы с упругими связями модель доработана блоками, учитывающими указанную особенность в соответствии со следующей системой дифференциально-интегральных уравнений:

$$J_{dv} \frac{d\omega_{dv}}{dt} = M_{dv} - M_{uc}; J_{\Sigma пр. мех} \frac{d\omega_{mex}}{dt} = M_{uc} - M_{ct}; \\ M_{uc} = C(\varphi_1 - \varphi_2); \varphi_1 = \int \omega_{dv} dt; \varphi_2 = \int \omega_{mex} dt,$$

где  $J_{dv}$  — момент инерции ротора двигателя и шкива, находящегося на валу двигателя, которые вращаются со скоростью  $\omega_{dv}$ ;  $J_{\Sigma пр. мех}$  — суммарный приведенный момент инерции механизма, приведённый к валу шкива, вращающегося со скоростью  $\omega_{mex}$ ;  $M_{dv}$  — электромагнитный момент двигателя;  $M_{uc}$  — момент упругих сил;  $M_{ct}$  — момент статического сопротивления;  $\varphi_1$  — угол поворота вала двигателя;  $\varphi_2$  — угол поворота вала, вращающегося со скоростью  $\omega_{mex}$ ;  $C$  — коэффициент жёсткости клинового ремня.

Изучение изменения момента упругих сил и его влияния на характер движения механизма и вращения двигателя, а также анализ электромагнитных переходных и установившихся процессов в двигателе и электро-

механических процессов в электроприводе целесообразно выполнять на математических моделях. Для этих целей служат, в частности, такие вычислительные программы, как MATLAB-Simulink. В указанной среде разработана модель исследуемой двухмассовой системы, которая представлена на рис. 2. Компоновка модели проведена с использованием штатных и оригинально разработанных блоков. В модели асинхронная машина представлена системой дифференциальных уравнений на основе теории обобщённой машины [2], что реализуется блоками 4, 5 и 7. На выходе блока 7 имеется вычисленный электромагнитный момент двигателя ( $M_{dv}$ ), который формируется системой широтно-импульсного напряжения на обмотках статора двигателя, созданной по принципу, изложенному в изобретении [3] (блоки 1, 2 и 3). Согласно этому изобретению напряжение формируется из импульсов напряжения, регулируемых по ширине на положительных и отрицательных полупериодах нерегулируемого трёхфазного синусоидального напряжения, расположенных определённым способом в количестве трёх, шести и т. д. импульсов. Такое широтно-импульсно модулированное напряжение (ШИМ-напряжение) формирует линейную выходную характеристику регулятора напряжения, уменьшает уровень токов от высших гармонических составляющих питающего напряжения, снижает уровень греющих потерь в активной составляющей общих потерь двигателя, а это приводит к определённому расширению диапазона регулирования скорости двигателя, создаёт условия энергосбережения в его установившихся и переходных режимах.

Блоки 1–15 характеризуют одну из масс рассматриваемой двухмассовой системы. Вторая масса упомянутой системы представлена блоками 24–34. Упругое звено, соединяющее эти массы, реализуется блоками 27, 29, 30, 31 и блоком 32, на выходе которого создаётся момент упругих сил ( $M_{uc}$ ). Моделирование режимов работы рассматриваемого электропривода осуществляется блоками 14 и 15, 26 и 27. По результатам этого моделирования можно составить представление об энергетике режимов, что выполняется

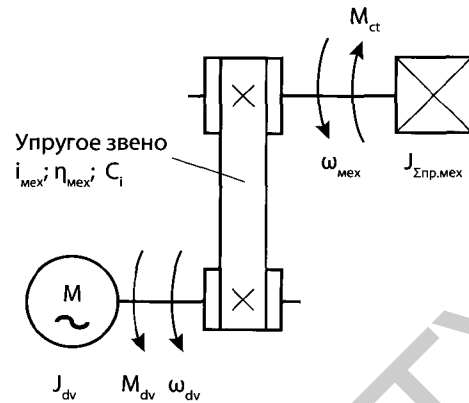


Рис. 1. Кинематическая схема расчётной двухмассовой системы ( $M_{dv}$  — электромагнитный момент двигателя;  $\omega_{dv}$  — частота вращения вала двигателя;  $J_{dv}$  — момент инерции ротора двигателя;  $i_{mex}$  — передаточное отношение ременной кинематической передачи;  $\eta_{mex}$  — коэффициент полезного действия кинематической передачи;  $C_i$  — коэффициент жёсткости клинового ремня;  $M_{ст}$  — момент статического сопротивления механизма;  $\omega_{mex}$  — частота вращения входного вала механизма;  $J_{\Sigma пр. мех}$  — суммарный приведённый момент инерции механизма

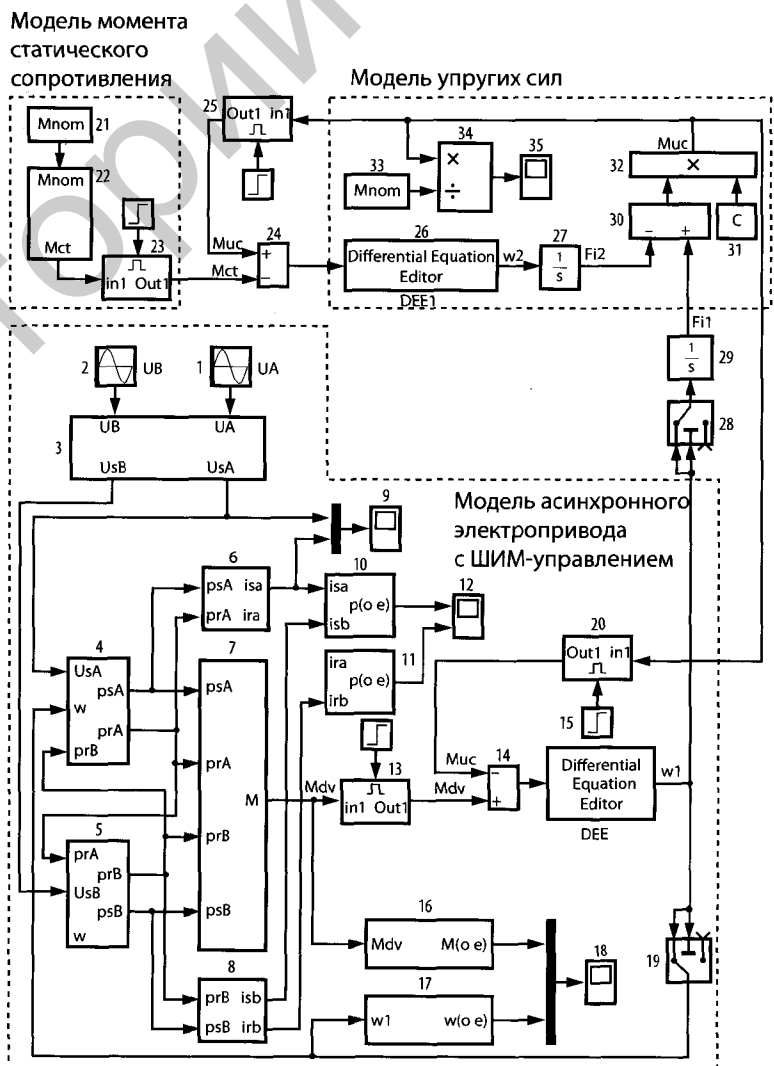


Рис. 2. Модель асинхронного электропривода с ШИМ-управлением и упругими связями

блоками 6, 8, 10 и 11 в относительных единицах. Момент статического сопротивления механизма ( $M_{ст}$ ) определяется блоками 21, 22, причём блок 22 позволяет изменять его значение по ходу выполнения технологического цикла. Известно, что электропривод не придёт в движение до тех пор, пока электромагнитный момент двигателя не превысит момент статического сопротивления механизма. При возникновении движения в электроприводе появляются и момент статического сопротивления, и момент упругих сил.

Это условие разделяет модель как бы на две: одна должна моделировать процессы до начала движения (электромагнитные процессы в двигателе), а вторая — после (электромеханические процессы в электроприводе). Это условие реализовано введением блоков 13, 20, 23 и 25. Время перехода в работе модели от одной к другой определяется проще всего при наладке модели. Для визуализации процессов в соответствующих точках модели подключены осциллографы, например 12 или 19.

Апробацию модели выполняли расчётами режимов технологического цикла двухкрасочной офсетной печатной машины, приводимой в движение асинхронным двигателем типоразмера 4А80В2У3 со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} P_{ном} &= 2,2 \text{ кВт}; U_{ном.ф} = 220 \text{ В}; \omega_{ном} = 298,3 \text{ рад/с}; \\ \omega_0 &= 314 \text{ рад/с}; I_{ном} = 4,616 \text{ А}; \eta_{ном} = 83 \% \\ \cos\phi_{ном} &= 0,87; R_s = 3,304 \text{ Ом}; R_r = 2,346 \text{ Ом}; \\ L_s &= 0,398 \text{ Ом}; L_r = 0,397 \text{ Ом}; L_m = 0,383 \text{ Ом}; \\ J_{дв} &= 0,0021 \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \end{aligned}$$

Передача механического момента с вала двигателя к рабочей машине осуществляется кордошнуровым ремнём (ГОСТ 1284-45) сечением  $B = 2,3 \text{ см}^2$ , с модулем упругости  $E = 2500 \text{ кг/см}^2$  и длиной упругого элемента 640 мм, что обуславливает коэффициент жёсткости ремня  $C = 89,844$ .  $C = sE / l$ , где  $s$  — площадь поперечного сечения ремня,  $\text{м}^2$ ;  $E$  — модуль упругости растяжения материала ремня,  $\text{кг/м}^2$ ;  $l$  — длина одной ветви клинового ремня,  $\text{м}$ .

Примерный технологический цикл печатной машины включает:

- ♦ достижение электромагнитным моментом двигателя значения момента холостого хода механизма  $M_{х.х} = 0,25M_{ном}$ , что характеризуется временем запаздывания  $t_{зап}$ ;
- ♦ управляемый разгон машины с моментом холостого хода до скорости, соответствующей напряжению питания  $0,7U_{ном}$ , за время  $t_{рег.возд1}$ ;
- ♦ работу на холостом ходу с напряжением питания  $0,7 U_{ном}$  в течение времени  $t_{пост.возд}$ ;

- ♦ управляемый разгон машины с моментом холостого хода до скорости, соответствующей номинальному напряжению питания, за время  $t_{рег.возд2}$  перед набросом нагрузки;
- ♦ наброс номинального момента нагрузки (включение натиска) и работа с ним в течение  $t_{раб}$ ;
- ♦ сброс нагрузки (выключение натиска) и работа на холостом ходу с номинальным напряжением питания двигателя  $t_{х.х2}$ ;
- ♦ управляемое торможение машины с моментом холостого хода до скорости, соответствующей достижению электромагнитным моментом двигателя момента холостого хода рабочей машины  $t_{упр.торм}$ .

В частности, результаты моделирования представлены на рис. 3 в виде эпюр задания ШИМ-управления  $u_{зад}^* = f(t)$ , частоты вращения вала  $\omega^* = f(t)$  и электромагнитного момента двигателя  $M_{дв}^* = f(t)$ .

Анализ результатов приводит к выводу, что эпюр скорости полностью отражает временной характер, задаваемый желаемой диаграммой изменения угла управления ШИМ-напряжением, а численные значения скорости также соответствуют реальным скоростям: электропривод имеет скорость, определённую моментом холостого хода, а после наброса нагрузки в размере его номинального момента он достигает номинальной скорости. Соответствие реальным процессам показывает эпюр электромагнитного момента: в начальном этапе действуют свободная и вынужденная составляющие развития момента. После затухания свободной составляющей на валу электропривода действует вынужденная составляющая, задаваемая углом управления ШИМ-напряжением, создавая динамический момент и ускорение механизма.

Следует обратить внимание на развитие электромагнитного момента двигателя на участке  $t_{хх1}$ , на котором в целях создания энергосберегающего режима на обмотки двигателя подаётся напряжение  $0,7 U_{ном}$ , состоящее согласно изобретению из трёх импульсов на каждом полупериоде. Момент носит колебательный гармонический характер с частотой колебаний примерно 70 Гц, однако в силу инерционности механической части электропривода не оказывает существенного влияния на скорость ротора двигателя в установившемся режиме. Эпюр скорости показывает, что она имеет значительные колебания именно в переходных процессах (на рис. 3 наброс  $t = 10 \text{ с}$  или сброс нагрузки  $t = 16 \text{ с}$ ), которые затухают с исчезновением колебаний электромагнитного момента.

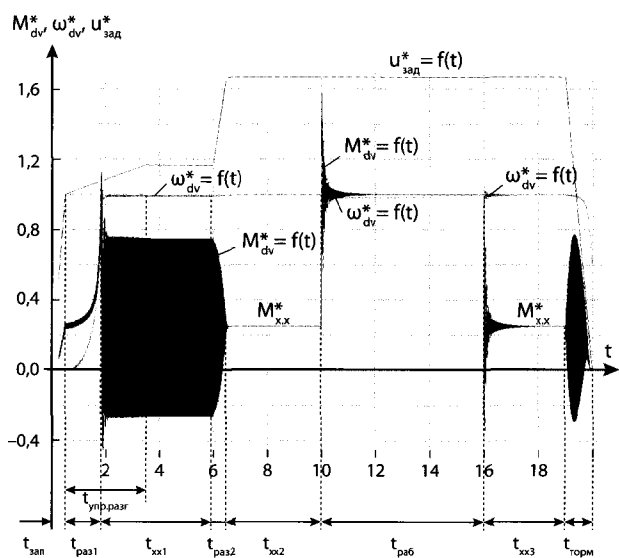


Рис. 3. Эпюры задания ШИМ-управления  $u_{зад}^* = f(t)$ , частоты вращения вала двигателя  $\omega_{дв}^* = f(t)$  и его электромагнитного момента  $M_{дв}^* = f(t)$

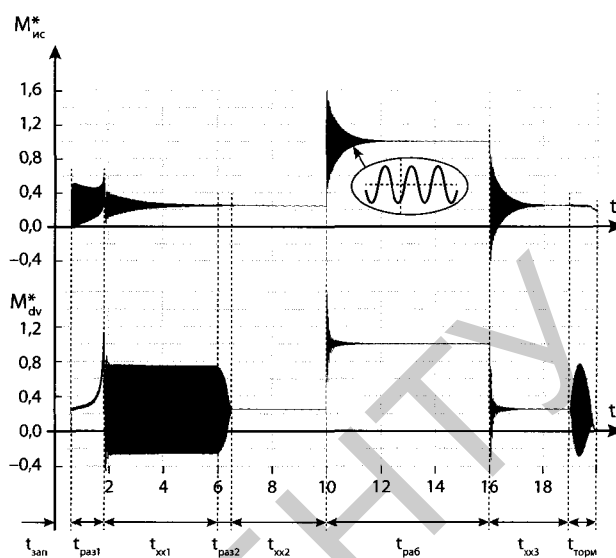


Рис. 4. Эпюры момента упругих сил в ветви клинового ремня  $M_{ис}^* = f(t)$  и электромагнитного момента двигателя  $M_{дв}^* = f(t)$

При разработке модели важно было получить возможность исследования момента упругих сил, действующих в ремне как в упругой части кинематической передачи. Модель позволяет выполнить эту оценку, анализируя эпюр момента упругих сил, приведенный на рис. 4. Момент упругих сил также носит колебательный гармонический характер с частотой колебаний примерно 70 Гц в динамических процессах электропривода. Вместе с тем амплитуда колебаний момента упругих сил превышает амплитуду колебаний электромагнитного момента двигателя, что объясняется упругостью материала, из которого изготовлен ремень. В статических режимах работы электропривода как электромагнитный момент двигателя, так и момент упругих сил не имеют колебаний. Зная значения момента упругих сил и конструктивные размеры кинематической передачи, можно вычислить усилия, действующие в ветвях ремня и сопоставить их с допустимыми значениями.

### Выводы

Модель позволяет исследовать электромагнитные переходные и установившиеся процессы в двигателе и электромеханические процессы в электроприводе при разных нагрузках и конечных значениях скорости механизма. Работоспособность модели подтверждает достоверность предлагаемого ШИМ-управления и предполагаемые преимущества такого управления.

Результаты исследований создают условия для анализа продольной упругой силы в клиновом ремне кинематической передачи, что целесообразно в случаях

его замены нестандартным или апробирования вновь сконструированных.

Анализ результатов исследований подтверждает, что момент упругих сил носит колебательный характер с затухающей амплитудой. Время затухания определяется инерционностью электропривода и механизма, а также конструктивным решением клиноременной передачи. При разных модулях упругости растяжения материала ремня максимальная амплитуда колебаний составляет  $\pm 45-50\%$  номинального значения момента нагрузки.

Применение различных законов изменения угла управления ШИМ-напряжением в переходных процессах создаёт возможности реализации требуемых ускорений и необходимого позиционирования механизма. ЭИИ

### Литература

1. Квятковская, Ал. А. Имитационная модель асинхронного электропривода с параметрическим управлением / Ал. А. Квятковская, Ан. А. Квятковская // Материалы XII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов в 2 ч., ч. 1 — Гомель : ОУ «ГГУ им. Ф. Скорины», 2009.
2. Беляев, В.П. Электромеханика. Электромеханическое преобразование при частотном управлении электрическими машинами / В.П. Беляев, Л. М. Давидович. — Минск : БГТУ, 2004.
3. Способ широтно-импульсной модуляции выходного напряжения переменного тока: А. С. 764096 Н 02 Р 13/18 / В.П. Беляев, Г.И. Гульков, В.Г. Сидоров; заявитель Белорус. политехн. ин-т (СССР) / № 2684826/24-07; заявл. 10.11.1978; опубл. 15.09.80 в Б. И. № 34 1980.