

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

ЭЛЕКТРОПРИВОД С УДАРНОЙ НАГРУЗКОЙ В ПОЛИГРАФИИ

В статье приводятся результаты анализа технологических циклов ряда полиграфических машин, таких как одноножевая резальная машина (ОРМ), вырубной пресс, машина для биговки и перфорации, проволокошвейная машина, тигельная печатная машина и т. п., выполняющих определенные послепечатные процессы. Реализуются они механической работой исполнительного механизма, характеризующейся кратковременным (ударным, импульсным) воздействием на заготовку. Показано влияние сил гравитации на создание технологической машиной момента статического сопротивления. В ходе выполнения рабочим органом цикла получения изделия они либо увеличивают указанный момент, либо уменьшают. Выполнение технологического цикла кратковременное, занимает несколько секунд, а сама операция изготовления изделия – доли секунды, секунду, и именно в это время происходит основная механическая работа. Такую механическую нагрузку принято характеризовать как ударную. Механическая энергия для рассматриваемых процессов вырабатывается электромеханическими системами на основе трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, который также получает ударный вид нагрузки.

Обращено внимание на одну общую конструктивную особенность указанных машин, состоящую в том, что момент, развиваемый электродвигателем, передается исполнительному органу через клиноременную передачу, являющуюся упругим звеном. Для выявления влияния упругих сил на работу электропривода как на двухмассовую электромеханическую систему проведено ее моделирование в вычислительной среде *MathLab-Simulink* и расчеты режимов такого электропривода.

Модель учитывает изменения параметров электропривода при совершении технологического цикла, вызванного изменениями инерционных сил, и построения кинематики. Приведена схема модели. Отображены результаты расчета одного режима – эпюры электромагнитного момента электродвигателя и его скорости. При этом проведен анализ развития и влияния упругих сил, а также сделаны соответствующие выводы.

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

Для цитирования: Беляев В. П. Электропривод с ударной нагрузкой в полиграфии // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2023. № 1 (267). С. 5–13. DOI: 10.52065/2520-6729-2023-267-1-1.

V. P. Belyaev

Belarusian State Technological University

ELECTRIC DRIVE WITH SHOCK LOAD IN THE PRINTING INDUSTRY

The article presents the results of the analysis of the technological cycles of a number of printing machines, such as a single-knife cutting machine (ORM), a punching press, a running and first-

breaking machine, a wire sewing machine, a crucible printing machine, etc., which complete the post-printing processes. They are realized by the mechanical operation of the actuator, characterized by a short-term (shock, impulse) effect on the workpiece. The influence of gravitational forces on the creation of a static resistance moment by a technological machine is shown. During the performance of the product production cycle by the working body, they either increase the specified moment or reduce it. The execution of the technological cycle is short-term, taking several seconds, and the operation of manufacturing the product is a fraction of a second, a second, and it is at this time that the main mechanical work is performed. Such a mechanical load is usually characterized as a shock load. Mechanical energy for the processes under consideration is generated by electromechanical systems based on a three-phase asynchronous short-circuited electric motor, which also has a shock load. Attention is drawn to one common design feature of these machines, which consists in the fact that the moment developed by the electric motor is transmitted to the executive body through the V-belt transmission, which is an elastic link. To identify the influence of elastic forces on the operation of the electric drive, as on a two-mass electromechanical system, its modeling and calculations in the MathLab-Simulink computing environment of the modes of such an electric drive were carried out. The model takes into account changes in the parameters of the electric drive during the technological cycle caused by changes in inertial forces and the construction of kinematics. The model diagram is shown. The results of the calculation of one mode are displayed – the plots of the electromagnetic moment of the electric motor and its speed. At the same time, an analysis of the development and influence of elastic forces is carried out and conclusions are drawn.

Keywords: AC electric drive, pulse width voltage modulation, modeling.

For citation: Belyaev V. P. Electric drive with shock load in the printing industry. *Proceedings of BSTU, issue 4, Print- and Mediatechnologies*, 2023, no. 1 (267), pp. 5–13. DOI: 10.52065/2520-6729-2023-267-1-1 (In Russian).

Введение. Выполнение ряда послепечатных технологических процессов совершается механической работой исполнительного механизма, характеризующейся кратковременным (ударным, импульсным) воздействием на заготовку. Группа полиграфического оборудования с ударным характером механической работы выполнения технологического процесса изготовления продукции включает в себя такие машины, как одноножевая резальная машина (ОРМ), вырубной пресс, машина для биговки и перфорации, проволокошвейная машина, тигельная печатная машина и т. п. Механическая энергия для них вырабатывается электромеханическими системами на основе трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя. Построение кинематических передач для выполнения технологического процесса исполнительным механизмом имеет одну общую особенность, заключающуюся в том, что механический момент, развиваемый электродвигателем, передается с его вала к исполнительному органу (например, в ОРМ – механизму ножа; в вырубном прессе – тиглю; в машине для биговки и перфорации – траверсе) через клиноременную передачу на маховик с электромагнитной муфтой сцепления или однооборотной муфтой, расположенный на главном валу, а затем через свою кинематику к рабочему органу. Таким образом, имеется работа электропривода на холостом ходу (включение

двигателя и вращение клиноременной передачи); включение муфты сцепления, в результате чего организуется холостой ход технологической машины (движение машины без выпуска продукции); работа электропривода по выполнению технологического процесса (в ОРМ – рез ножом материала; в вырубном прессе – вырубка изделия из материала; в машине для биговки и перфорации – изготовление бига или перфорации); работа электропривода по возвращению исполнительного органа в исходную позицию (холостой ход технологической машины – ТМ); выключение муфты сцепления (холостой ход электропривода) и дальнейшая его работа в этом режиме до начала следующего цикла. Одним из выводов оценки описанных процессов является то, что в режиме холостого хода электропривода двигатель работает при номинальном напряжении на обмотках статора, чем и оценивается его энергетическое состояние (активные потери в обмотках статора и ротора; коэффициент полезного действия и коэффициент мощности). Проведя анализ механического движения исполнительных органов упомянутых полиграфических машин, можно сделать вывод о том, что в принципе одни из них двигаются в вертикальном направлении (вверх-вниз), другие имеют угловое перемещение (из начального некоторого горизонтального положения в вертикальное). И в том и в другом случае момент статического сопротивления

механизма для электропривода является активной нагрузкой. В механизмах с вертикальным перемещением исполнительного органа силы гравитации способствуют выполнению технологического процесса, в то время как в механизмах углового перемещения они нерационально нагружают электродвигатель и не участвуют в реализации технологического процесса, а только оказываются полезными при возвращении исполнительного органа в исходное положение.

Основная часть. Рассмотрим одну из концепций управления электроприводом ударного действия на примере электропривода вырубного пресса, общий вид которого представлен на рис. 1 [1]. Для выполнения технологического процесса вырубки изделия – загрузка заготовки на талер в исходной позиции – поворот талера на позицию вырубки – вырубка изделия – поворот талера на исходную позицию – выгрузка готового изделия и отходов – механическая энергия, вырабатываемая электродвигателем, передается через кинематическую передачу рабочему органу – талеру при включении электромагнитной муфты.

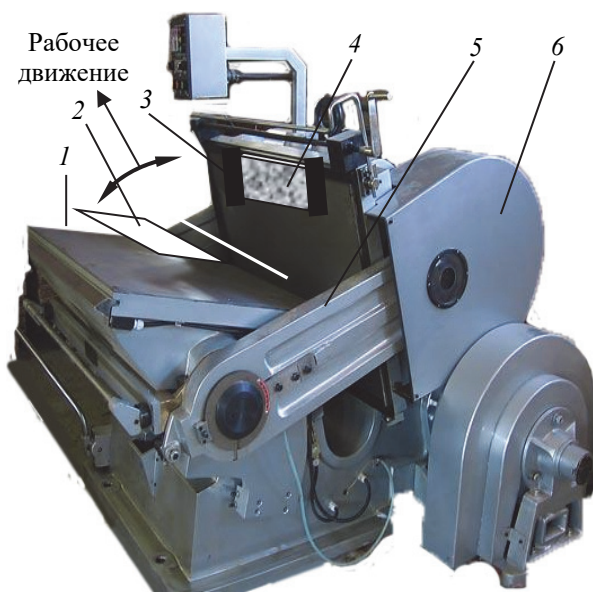


Рис. 1. Общий вид пресса:

- 1 – плита тигля; 2 – заготовка; 3 – плита талера;
4 – штамп; 5 – соединительная тяга;
6 – маховик с электромагнитной муфтой

Принципиальная схема движения тигля представлена на рис. 2, на котором показаны два его положения, получающиеся за счет вращения шестерни: позиция загрузки заготовки и позиция вырубки изделия. При вращении шестерни эксцентричное крепление тяги на ней создает качательное движение тигля из одной позиции в другую и обратно.

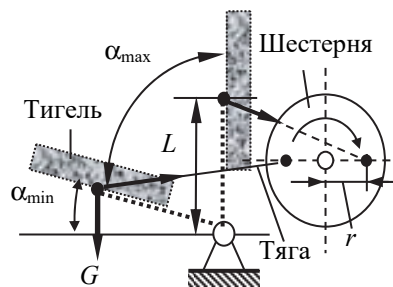


Рис. 2. Принципиальная схема движения тигля

Шестерня-тяги – это, в сущности, кривошипно-шатунный механизм, в котором радиус r закрепления одного конца тяги на шестерне представляется кривошипом, а тяга – шатуном.

Обратим внимание на характер перемещения тигля. Оно выполняется из некоторого горизонтального положения (рабочая поверхность плиты тигля наклонена под углом 15° к горизонту [1]) в вертикальное (рабочая поверхность плиты тигля находится под углом 90° к горизонту), в котором совершается вырубка изделия за счет механической работы плиты тигля (максимальное значение момента статического сопротивления на валу двигателя). В процессе такого перемещения меняется усилие подъема плиты тигля в силу его вертикального перемещения с переменным углом по отношению к плите талера. Оно определяется следующим выражением:

$$F_{\text{под}} = k \cos \alpha,$$

$$F(\alpha) = \begin{cases} \alpha \in \alpha_{\min}, & \alpha = 15^\circ, \\ \alpha \in (90^\circ - \alpha_{\min}), & \alpha = \alpha_{\max} \end{cases},$$

где k – коэффициент, значение которого определяется весом тигля G и длиной тяги L , а α – угол перемещения тигля.

На основе анализа этого выражения делается вывод, что изменение усилия перемещения тигля носит косинусоидальный характер. Согласно инструкции по эксплуатации вырубного пресса его производительность составляет 25 циклов/мин, т. е. его единичный технологический цикл вырубки изделия осуществляется за 2,4 с [1]. Это предоставляет возможность сформировать график нагрузки для электропривода. При его составлении необходимо учесть, что при подъеме тигля силы гравитации дополнительно нагружают электропривод ($M_{\text{xx. вв}}$), а при опускании – разгружают ($M_{\text{xx. вв}}$), т. е. согласно теории электропривода на валу двигателя действует активный момент статического

сопротивления (например, [2]). На основании вышеизложенного график изменения момента статического сопротивления на валу электродвигателя (механической работы) представлен на рис. 3. Проанализировав построение электроприводов рассматриваемой группы полиграфических машин, можно прийти к выводу о том, что большинство их имеют в составе своей кинематики первое кинематическое звено – клиноременную передачу. Клиновым ремнем – основной элемент таких передач. Он обладает определенной жесткостью (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 электропривода для промышленного оборудования, так и при его исследовании и использовании.

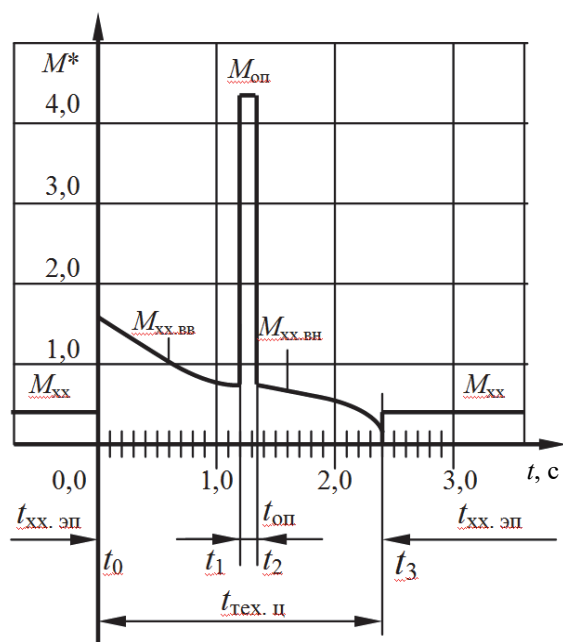


Рис. 3. График изменения механической работы при выполнении вырубki изделия

Наличие упругих связей в электроприводе предусматривает его оценку как двухмассовой электромеханической системы [2, 3]:

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{упр}} = J_{\text{дв. шк}} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt};$$

$$M_{\text{упр}} - M_{\text{ст}} = J_{\Sigma \text{пр. мех}} \frac{d\omega_{\text{мех}}}{dt};$$

$$M_{\text{упр}} = C(\varphi_1 - \varphi_2);$$

$$\varphi_1 = \int \omega_{\text{дв}} dt, \quad \varphi_2 = \int \omega_{\text{мех}} dt,$$

где $M_{\text{дв}}$ – электромагнитный момент двигателя; $M_{\text{упр}}$ – момент упругих сил; $J_{\text{дв. шк}}$ – момент инерции ротора двигателя и шкива, находящегося на валу двигателя, которые вращаются со скоростью $\omega_{\text{дв}}$; $M_{\text{ст}}$ – момент статического сопротивления; $J_{\Sigma \text{пр. мех}}$ – суммарный приведенный к валу шкива, вращающегося со скоростью $\omega_{\text{мех}}$, момент инерции механизма; C – коэффициент продольной жесткости материала клинового ремня; φ_1 – угол поворота вала двигателя; φ_2 – угол поворота вала, вращающегося со скоростью $\omega_{\text{мех}}$.

Апробация модели выполнялась расчетами режимов технологического цикла прессы вырубki изделий, приводимого в движение асинхронным электродвигателем. Выбор мощности электродвигателя осуществлен по методике, изложенной в работе [4]. Результат выбора – электродвигатель типоразмера АИР100L6У3 со следующими номинальными данными: $P_{\text{ном}} = 2,2$ кВт; $\omega_0 = 104,7$ рад/с; $I_{\text{ном}} = 5,6$ А; $s_{\text{ном}} = 6,5\%$; $\cos\varphi = 0,76$; $\eta_{\text{ном}} = 79,0\%$; $J_{\text{дв}} = 0,02$ кг·м²; $n_{\text{ном}} = 935$ об/мин; $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}} = 6,0$; $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}} = 2,1$ [5].

Передача механического момента с вала двигателя к рабочей машине осуществляется кордшнуровым ремнем (по ГОСТ 1284.1–89 «Ремни приводные клиновые нормальных сечений») сечением типа А площадью поперечного сечения, равной $s = 0,81$ см²; с модулем продольной упругости материала ремня $E = 5100$ кгс/см² (из предлагаемых научной литературой значений модуля продольной упругости в диапазоне 5100–61200 кгс/см² выбираем наименьшее значение) и длиной одной ветви упругого элемента $l = 640$ мм. Это обуславливает коэффициент жесткости клинового ремня $C = sE / l = 64,55$ кгс/см. В рассматриваемом механизме использована двухременная передача. При проведении исследований электропривода с такой передачей следует учесть коэффициент жесткости второго ремня. Для изучения электропривода ударного действия воспользуемся моделированием физических процессов, поскольку признано, что моделирование достоверно отражает их сущность [6]. Опираясь на этот постулат, проводим исследование установившихся и переходных процессов, а также энергетического состояния рассматриваемого регулируемого асинхронного электропривода с ШИМ-управлением [7].

Автором в вычислительной среде *MahtLab-Simulink* разработана модель регулируемого электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем. *Simulink* – это интерактивный программный продукт для моделирования нелинейных динамических систем [8]. В виртуальную модель заложено математическое описание режимов асинхронного электропривода

на основе теории обобщенной машины [9]. В ней выполняется решение электромагнитных процессов электродвигателя с последующим решением электромеханических процессов электропривода. Это реализуется при условии достижения электромагнитным моментом двигателя значения большего, чем значение момента статического сопротивления ТМ, после чего начинается движение электропривода и решение электромеханических процессов, в соответствии с его уравнением движения. В штатных примерах среды *MathLab* это не оговарива-

ется. В предложенной модели имеется логическое переключающее устройство. Оно предназначено для перехода модели к решению уравнения движения электропривода при измененных условиях его функционирования, которое происходит при выполнении этапов технологического цикла, когда меняется конфигурация кинематики. И, соответственно, приведенный момент инерции электропривода и момент статического сопротивления механизма. Результат такой разработки приведен на рис. 4.

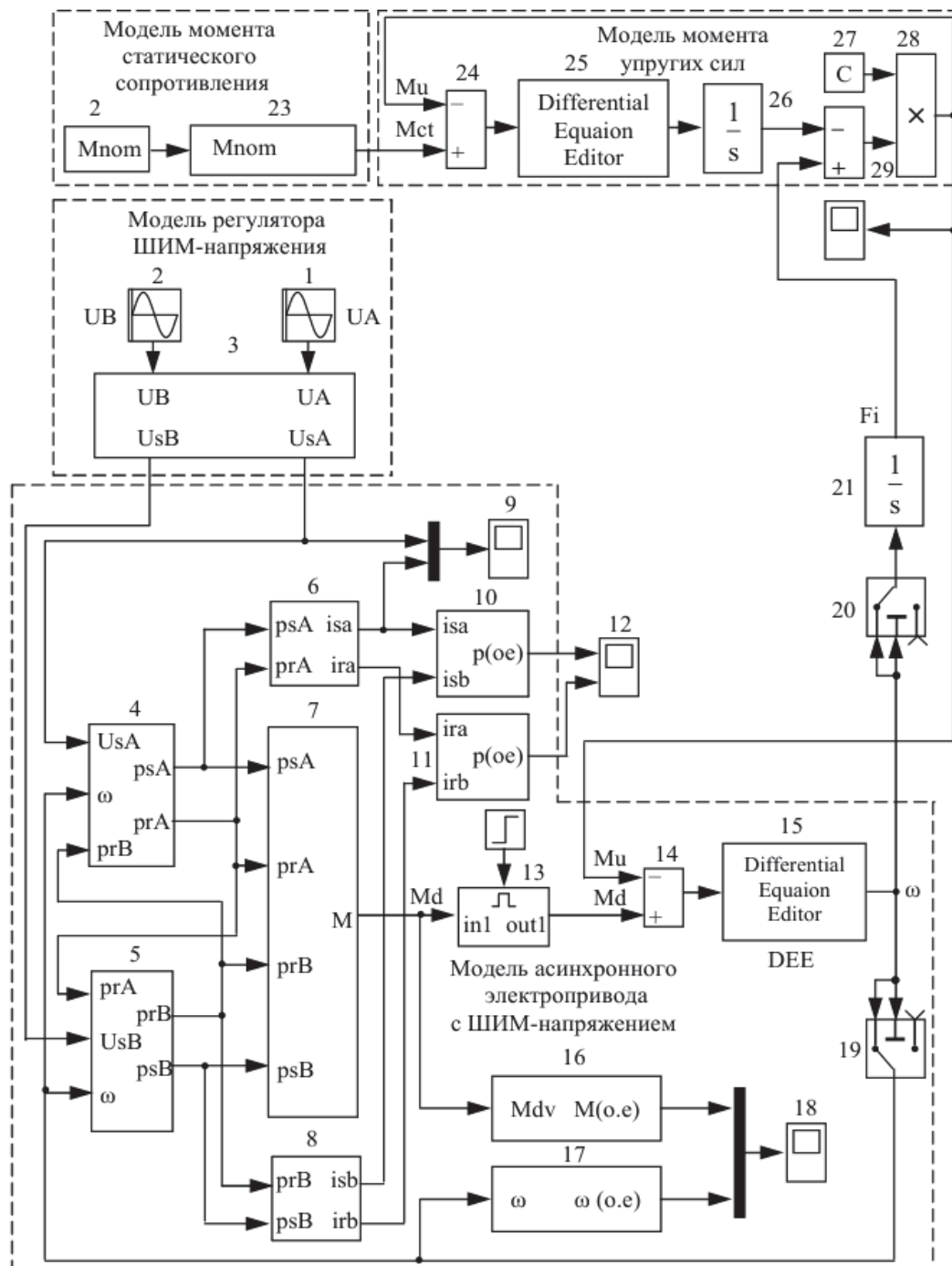


Рис. 4. Схема модели для исследования регулируемого электропривода с упругими связями

Разработанная модель с целью исследования электропривода с ударной нагрузкой и упругими связями в кинематике ТМ содержит блоки, учитывающие указанную особенность в соответствии с приведенной выше системой дифференциально-интегральных уравнений.

Всем производственным механизмам целесообразно организовывать управляемый по интенсивности (ускорению) разгон, обеспечивая в их кинематике безударное прохождение механического момента от вала электродвигателя [10]. Известно, что это создает долгосрочную эксплуатацию механической части технологического оборудования, для которого существуют регламентные значения угловых и линейных ускорений [11]. Обеспечение оптимального с этой точки зрения разгона достигается управлением пуском приводного электродвигателя. В электроприводе с полупроводниковым регулятором напряжения реализуется параметрическое управление. Классическое параметрическое управление обладает определенными недостатками по созданию качественных механических характеристик электропривода, небольшим диапазоном регулирования скорости, однако в части формирования переходных процессов технологического оборудования успешно используется [12, 13]. Автором предложено оригинальное параметрическое управление на основе широтно-импульсной модуляции [7]. Рекомендованный прием модуляции подавляет определенные высшие гармонические составляющие в выходном напряжении регулятора, состоящем из нескольких импульсов m . При $m = 3$ в нем присутствуют гармоники, начиная с 5-й и далее; при $m = 6$ в нем присутствуют гармоники, начиная с 11-й и далее. Возрастание номера гармоники влечет за собой увеличение полного сопротивления электрических и магнитного контуров электродвигателя (импеданс машины). Это приводит к малым значениям тока в обмотках двигателя от каждой высшей гармонической составляющей напряжения. Следовательно, предложенное ШИМ-напряжение создает малые по значению электромагнитные моменты электродвигателя, снижает уровень основных греющих потерь в активной составляющей общих потерь двигателя, а это приводит к определенному расширению диапазона регулирования скорости двигателя, создает условия энергосбережения в его установившихся и переходных режимах. Принимая во внимание изложенный материал, проведем исследование электропривода с ударной нагрузкой. В модель регулятора напряжения заложено ШИМ-напряжение с $m = 6$. Закон измене-

ния его выходного напряжения предусматривает быстрое ($t_{\text{зап}} = 0,1$ с) увеличение напряжения до значения, при котором электромагнитный момент двигателя создаст механический момент на его валу, превышающий момент холостого хода ТМ, и начнется движение электропривода. При данных условиях электропривод проработает некоторое время – время холостого хода, например ($t_{\text{х. х}} = 1$ с). Затем перед совершением технологической операции – вырубкой изделия – напряжение на выходе регулятора напряжения устанавливается равным $U_{\text{ном}}$. Включается электромагнитная муфта и механический момент передается рабочему органу – талеру. После изготовления изделия и возвращения талера в положение загрузки заготовки электромагнитная муфта выключается, выходное напряжение регулятора уменьшается.

Вариант расчета режимов регулируемого электропривода представлен на рис. 5. Здесь $t_{\text{зап}}$ соответствует развитию электромагнитных процессов в обмотках двигателя до создания на его валу механического момента, превышающего момент холостого хода электропривода (момент статического сопротивления ТМ).

Это достигается увеличением действующего напряжения на обмотках двигателя от нуля до значения $U_{\text{дейст}} = 0,4U_{\text{дейст. ном}}$ ШИМ-управлением за $t = 0,5$ с. После следует разгон электропривода ($t_{\text{пуск}}$) до установившейся скорости, соответствующей моменту холостого хода электропривода, при напряжении на обмотках двигателя $U_{\text{дейст}} = 0,4U_{\text{дейст. ном}}$. Время $t_{\text{х. х1}}$ определяет работу электропривода на холостом ходу при действующем напряжении на обмотках двигателя, равном $U_{\text{дейст}} = 0,4U_{\text{дейст. ном}}$, с последующим его увеличением до $U_{\text{дейст}} = U_{\text{дейст. ном}}$ перед выполнением вырубкой изделия. Для осуществления технологической операции включается электромагнитная муфта сцепления, соединяющая в единую цепь кинематику ТМ, передавая механическую энергию рабочему органу – талеру. Он поднимается к месту совершения вырубкой изделия за время $t_{\text{под}}$, выполняет вырубку изделия за время $t_{\text{оп}}$ и опускается в положение загрузки заготовки за время $t_{\text{опуск}}$. В положении загрузки заготовки электромагнитная муфта отключается. Время $t_{\text{х. х2}}$ определяет работу электропривода на холостом ходу при действующем напряжении на обмотках электродвигателя, равном $U_{\text{дейст}} = U_{\text{дейст. ном}}$. В дальнейшем электропривод переходит на холостой ход $t_{\text{х. х. элпр}}$ перед выполнением следующей вырубкой. При этом напряжение на обмотках двигателя равно $U_{\text{дейст}} = 0,4U_{\text{дейст. ном}}$.

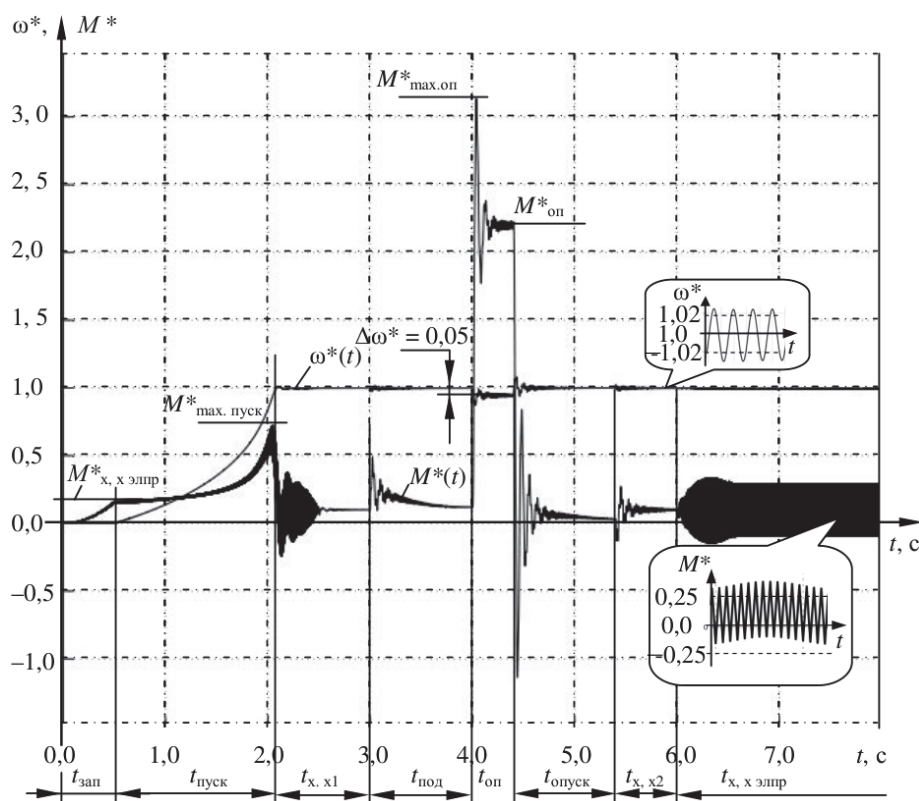


Рис. 5. Эпюры электромагнитного момента двигателя $M^*_{дв} = f(t)$ и его скорости $\omega^*_{дв} = f(t)$

Главным в оценке работы рассматриваемого электропривода выступает момент упругих сил, представленный на рис. 6. Возникают упругие силы в моменты изменения статического сопротивления рабочего органа – талера, вызванного началом (завершением) его движения и выполнением технологической операции. Они носят быстропротекающий колебательный характер с частотой колебаний примерно 50 Гц и затуханием от максимальной амплитуды до минимальной. Время затухания определяется инерционностью электропривода и механизма (J), а также конструктивным решением клиноременной передачи (E и l). При разных модулях упругости растяжения (E) материала ремня максимальная амплитуда колебаний составляет $\pm 45\text{--}50\%$ номинального значения момента нагрузки.

Исследования показали, что момент упругих сил затухает быстро в силу стабилизации движения инерционных масс рабочего органа. Начальное значение амплитуды колебаний определяет момент статического сопротивления ТМ данного этапа технологического цикла и благодаря тому, что время некоторых технологических операций (например, вырубка изделия) мало (примерно $t_{оп} = 0,4\text{--}0,8$ с), затухание не успевает завершиться, а переходит в следующий этап колебаний с новой амплитудой.

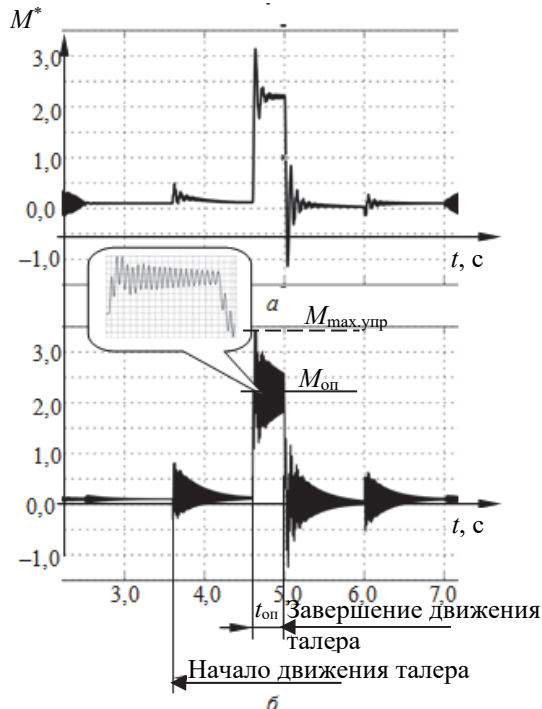


Рис. 6. Эпюры электромагнитного момента двигателя $M^*_{дв} = f(t)$ (а) и момента упругих сил $M^*_{упр. сил} = f(t)$ (б)

Например, в работе вырубного пресса этот момент наступает при возврате рабочего органа

на позицию заправки заготовки. Колебания момента упругих сил создают в теле клинового ремня переменные по значению усилия (напряжения) с частотой 50 Гц. Зная значения момента упругих сил и конструктивные размеры кинематической передачи, можно вычислить усилия (напряжения), действующие в ветвях ремня, и сопоставить их с допустимыми значениями. Эти усилия, циклически изменяющиеся за каждый пробег ремня по контуру передачи, приводят в итоге к усталостному состоянию материала ремня, различным видам деформации, трещинам резины слоя сжатия и расслоению ремня, что снижает его изнosoустойчивость [14]. Анализ продольной упругой силы в ремне целесообразен в случаях замены клинового ремня на нестандартный или апробирования вновь изготовленного.

Заключение. Момент статического сопротивления рабочего органа полиграфических машин ударного действия формируется не только механической работой выполнения технологического цикла, но и силами гравитации. Эта механическая работа имеет импульс-

ный характер. У таких машин одним звеном кинематики, передающим механическую энергию от электродвигателя рабочему органу, выступает клиноремная передача. Она оценивается как упругое звено, и электропривод такого построения рассматривается как двухмассовая система. Реализация технологического цикла (изготовление готового изделия – полезная нагрузка) создается включением и выключением электромагнитной муфты сцепления, встроенной в кинематику машины, собирающую ее в единое целое. Выполнение механической работы операции изготовления изделия носит ударный характер. Это создает ударные механические моменты на валу электропривода и как результат возникают упругие силы в клиновом ремне затухающего низкочастотного колебательного характера. Начальная амплитуда таких колебаний определяется параметрами электропривода и значением механической работы по изготовлению готового изделия.

Деформации, создаваемые упругими силами, снижают изнosoустойчивость ремня.

Список литературы

1. Инструкция на оборудование. Вырубной пресс ML-750. URL: <http://www.chinkopack.ru/chinko-manuals/251-vyirubnov-press-ml-750.php>. (дата обращения: 10.03.2023).
2. Ключев В. И. Теория электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 360 с.
3. Квартальнов Б. В. Динамика автоматизированных электроприводов с упругими механическими связями. М.; Л.: Энергия, 1965. 88 с.
4. Гейлер Л. Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. М.: Машгиз, 1958. 588 с.
5. Электродвигатели АИР – технические характеристики. URL: <http://nasoselprom.ru/production> (дата обращения: 10.03.2023).
6. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. М.: Высш. шк., 1976. 479 с.
7. Способ широтно-импульсной модуляции выходного напряжения переменного тока: а. с. 764096 (СССР); заявл. 1979; опубл. 1980. Бюл. № 34. 8 с.
8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
9. Беляев В. П. Электрооборудование полиграфических машин. Минск: БГТУ, 2012. 207 с.
10. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М.: Энергоиздат, 1981. 184 с.
11. Электротехнический справочник: в 3 т. / под ред. В. Г. Герасимова. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3. 616 с.
12. Шубенко В. А., Браславский И. Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия, 1972. 200 с.
13. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Academia, 2004. 202 с.
14. Характерные повреждения ременного привода с клиновыми ремнями и их причины. URL: <http://inserk.ru/index.php?id=134> (дата обращения: 10.03.2023).

References

1. Instructions for the equipment. Punching press ML-750. Available at.: <http://www.chinkopack.ru/chinko-manuals/251-vyirubnov-press-ml-750.php> (accessed 10.03.2023) (In Russian).
2. Klyuchev V. I. *Teoriya elektropivoda* [Theory of the electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 360 p. (In Russian).

3. Kvartal'nov B. V. *Dinamika avtomatizirovannykh elektroprivodov s uprugimi mekhanicheskimi svyaziyami* [Dynamics of automated electric drives with elastic mechanical links]. Moscow; Leningrad, Energiya Publ., 1965. 88 p. (In Russian).
4. Geyler L. B. *Elektroprivod v tyazhelom mashinostroyenii* [Electric drive in heavy engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 588 p. (In Russian).
5. AIR electric motors – technical characteristics. Available at: <http://nasoselprom.ru/production> (accessed 10.03.2023) (In Russian).
6. Venikov V. A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Theory of similarity and simulation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. 479 p. (In Russian).
7. Pulse-width modulation of AC output voltage. A. with. 764096 (USSR), 1980. 8 p. (In Russian).
8. 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, Peter Publ., 2008. 288 p. (In Russian).
9. Belyaev V. P. *Elektrooborudovaniye poligraficheskikh mashin* [Electrical equipment for printing machines]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 367 p. (In Russian).
10. 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).
11. V. G. Gerasimov. *Elektrotekhnicheskii spravochnik* [Electrotechnical reference], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, vol. 3. 616 p. (In Russian).
12. 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).
13. Braslavskiy I. Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow, Academia Publ., 2004. 202 p. (In Russian).
14. Typical damage to a belt drive with V-belts and their causes. Available at: <http://inserk.ru/index.php?id=134> (accessed 10.03.2023) (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

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 (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: beliaev@belstu.by

Поступила 20.02.2023