

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЗМОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ В ДВУХПЕРИОДНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

В.Ф. Егоров

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

E-mail: evf@zaorproxy.ru

Определены оптимальные режимы переходных процессов без наложения ограничения на перегрузочную способность электродвигателя. Показано, что основными факторами, влияющими на выбор максимальной величины момента двигателя в переходных процессах, являются относительная продолжительность включения, характер изменения динамических моментов, форма скоростного графика.

Ключевые слова:

Нагрузочный режим, скоростной режим, асимметричный, симметричный, двухпериодный.

Key words:

Mode of loadings, high-speed mode, asymmetric, symmetric, two-period.

Совершенствование электропривода за последние годы привело к созданию новых высокопроизводительных машин, работающих с частыми пусками, реверсами при большой нагрузке приводов [1]. Для повышения быстродействия таких механизмов стремятся максимально снизить длительность переходных процессов. С этой целью увеличивают перегрузочную способность электродвигателей, обеспечивая высокие пусковые и тормозные динамические моменты. Однако, как показывает анализ, перегрузочная способность привода значительной части производственных машин (ножниц заготовочных станков, нажимных устройств, манипуляторов, механизма опрокидывания конвертера и других) неоправданно необходимой мощности, не вызывая при этом существенного увеличения быстродействия [2]. Сохранение сложившейся практики выбора двигателя, стремление к повышению его перегрузочной способности, опережение темпов роста мощности при незначительном увеличении быстродействия не могут обеспечить эффективного выполнения возросших требований производства. Организация технологических процессов по минимуму удельного расхода электроэнергии вызывает необходимость применения более экономичных режимов пуска и торможения.

Целью настоящих исследований является развитие метода формирования переходных процессов на основе потерь энергии в электроприводе, без наложения ограничения по перегрузочной способности двигателя. В условиях, при которых необходимость ограничения пускового и тормозного моментов не возникает.

Двухпериодные скоростные режимы находят применение в механизмах с малыми заданиями перемещения (манипуляторы, нажимные устройства, механизмы подачи пилы и др.) В данном случае двигатель работает только в переходных процессах. Время их отработки зависит от интенсивности пуска и торможения. Для таких систем, нагрузочные

диаграммы стремятся формировать так, чтобы величина момента двигателя оставалась постоянной и равной максимально допустимому значению (рис. 1).

При соответствии эквивалентного момента двигателя

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i / t_{\text{ц}}}$$

его номинальному значению $M_{\text{эк}} = M_{\text{н}}$ длительность цикла для двигателей с независимой вентиляцией составит

$$t_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n \psi_i^2 t_i.$$

Продолжительность переходных процессов будет равна

$$t_{\text{н}} + t_{\text{т}} = \xi_0 \sum_{i=1}^n \psi_i^2 t_i = \frac{t_{\text{ц}}}{\psi_{0\text{эк}}^2},$$

где $t_{\text{н}}$, $t_{\text{т}}$ – время пуска и торможения; t_i – текущее значение времени; $\psi_i = M_i / M_{\text{н}}$ – кратность момента двигателя соответствующего участка; $\psi_{0\text{эк}}$ – кратность эквивалентного момента двигателя

$$\psi_{0\text{эк}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_i^2 t_i}{t_{\text{н}} + t_{\text{т}}}.$$

Значения параметров с индексом «0» приняты за базовые.

Относительная продолжительность включения, соответствующая этому условию, будет равна

$$\xi_0 = (t_{\text{н}} + t_{\text{т}}) / t_{\text{ц0}} = \frac{1}{\psi_{0\text{эк}}^2}.$$

Как следует из данного равенства, максимально допустимая эквивалентная кратность пусковых и тормозных моментов двигателя при работе в двухпериодном режиме движения пропорциональна квадрату относительной продолжительности включения.

Таким образом, пусковой и тормозной моменты двигателя должны выбираться с учетом относительной продолжительности включения механизма.

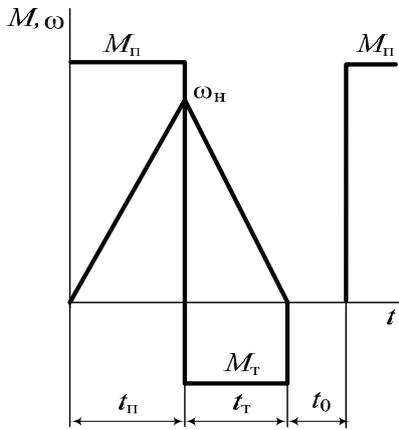


Рис. 1. Нагрузочная диаграмма и график изменения скорости электродвигателя

Выясним, как влияет относительная продолжительность включения на уровень использования перегрузочной способности двигателя в пусковых и тормозных режимах.

Из соотношений для времени пуска, торможения и отработки заданного общего угла перемещения

$$t_n = \frac{T_m}{\psi_n - \psi_c}; \quad t_t = \frac{T_m}{\psi_t + \psi_c};$$

$$\varphi = \frac{T_m^2}{2j} \cdot \frac{(\psi_n + \psi_t)}{(\psi_n - \psi_c)(\psi_t + \psi_c)}$$

находим время цикла

$$t_{\text{ц}} = \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{2\varphi J / M_n (\psi_n + \psi_t)}{(\psi_n - \psi_c)(\psi_t + \psi_c)}}$$

где $T_m = \frac{J\omega_n}{M_n} = j\omega_n$ – электромеханическая постоянная привода; J – приведенный момент инерции; $j = J/M_n$, $\psi_n = M_n/M_n$, $\psi_t = M_t/M_n$ – кратности соответственно момента инерции, пускового и тормозного моментов двигателя; $\psi_c = M_c/M_n$ – кратность статического момента нагрузки; ω_n – номинальная скорость двигателя.

Приняв $t_{\text{ц}} = t_{\text{ц0}}$, с учетом начальных условий,

$$\frac{\psi_n + \psi_t}{(\psi_n - \psi_c)(\psi_t + \psi_c)} = \frac{\psi_{n0} + \psi_{t0}}{(\psi_{n0} - \psi_c)(\psi_{t0} + \psi_c)} \psi_{\text{экс}}^4 \xi^2. \quad (1)$$

Для механизмов, работающих при большой частоте включений, важно получить максимальное быстродействие, т. е. отработку перемещения за минимальное время при ограничении тока или момента двигателя допустимым значением. Из-за различий в условиях ускорения и замедления (обычно замедление принимается несколько большим) скоростной режим имеет асимметричный характер, график скорости при этом представляет собой неравнобедренный треугольник.

Если $\psi_{n0} = \psi_{t0} = \psi_{\text{экс}} = \psi_0$, соответственно $\psi_n = \psi_t = \psi$, в этом случае равенство (1) примет вид

$$\frac{\psi}{\psi^2 - \psi_c^2} = \frac{\psi_0^5}{\psi_0^2 - \psi_c^2} \xi^2. \quad (2)$$

Зависимость (2) устанавливает связь между величиной допустимой кратности ψ пускового и тормозного моментов двигателя при заданной продолжительности включения ξ и значениями параметров ψ_0 , ψ_c . На рис. 2 представлены графики данной зависимости, построенные в соответствии с формулой (2).

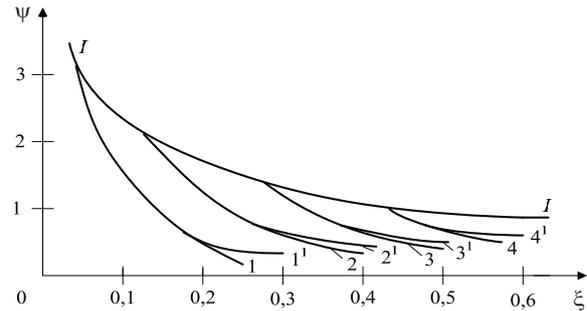


Рис. 2. Допустимая величина кратности пускового и тормозного моментов двигателя при заданной продолжительности включения ξ и значениях параметров ψ_0 , ψ_c : 1, 1' – $\psi_0=4$; 2, 2' – $\psi_0=3$; 3, 3' – $\psi_0=2$; 4, 4' – $\psi_0=1,5$; (1–4) при $\psi_c=0$; (1'–4') при $\psi_c=0,5$

Максимально допустимая перегрузка двигателя соответствует условиям $\xi = \xi_0$, $\xi_0 = 1/\psi_{\text{экс}}^2$ – кривая I–I и составляет

$$\psi_{0(\text{асим})}^{\text{max}} = \sqrt{1/\xi_0}. \quad (3)$$

Как следует из рис. 2, увеличение относительной продолжительности включения вызывает спад кривых, т. е. снижение кратности пусковых и тормозных моментов двигателя. Увеличение статической нагрузки нивелирует процесс (ветви 1'–4'), но в целом снижение сохраняется.

Рассмотрим возможность реализации более высоких значений моментов двигателя. в переходных процессах. Используя выражение для среднеквадратичного момента, и имея в виду, что $M_n = M_t = M$, находим

$$M_{\text{эк}} = M \sqrt{\frac{t_n + t_t}{t_{\text{ц}}}} = M \sqrt{\xi_0} = M/\psi_0.$$

При $M_{\text{эк}} = M_n$ допустимая величина пускового момента составит $M = M_n \psi_0$.

Таким образом, увеличение пускового и тормозного моментов двигателя M при заданной кратности $\psi_0 = 1/\sqrt{1/2\xi_0}$ возможно только за счет повышения его номинального момента.

При равных ускорениях пуска и замедления (симметричный скоростной режим) ввиду равенства динамических моментов ($M_n - M_c = M_t + M_c$) и значений их кратностей ($\psi_n - \psi_c = \psi_t + \psi_c$), а также длительностей периодов $t_n = t_t$, кратности эквивалентного момента нагрузки будет равна

$$\psi_{0(сим)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \psi_i^2 t_i / \sum_{i=1}^n t_i} = \sqrt{(\psi_{п0(сим)} - \psi_c)^2 + \psi_c^2} = \sqrt{1/\xi_0}.$$

Допустимая кратность пускового момента составляет

$$\psi_{п0(сим)} = \sqrt{1/\xi_0 - \psi_c^2} + \psi_c.$$

Как видно из представленной зависимости, при симметричных скоростных режимах существенное влияние на пусковой момент двигателя оказывает статическая нагрузка. Максимальное использование перегрузочной способности двигателя в переходных процессах достигается при кратности статической нагрузки $\psi_c = 1/\sqrt{1/2\xi_0}$ и соответствует

$$\psi_{п0(сим)}^{max} = \sqrt{2/\xi_0} \text{ или } \psi_{п0(сим)}^{max} \approx 1,41\psi_{п0(асим)}^{max}.$$

На практике обеспечить мгновенное изменение тока из-за наличия индуктивности в цепи якоря двигателя невозможно. Поэтому моменты переходных процессов стремятся сформировать приближающимися к трапецеидальному или треугольному виду (рис. 3).

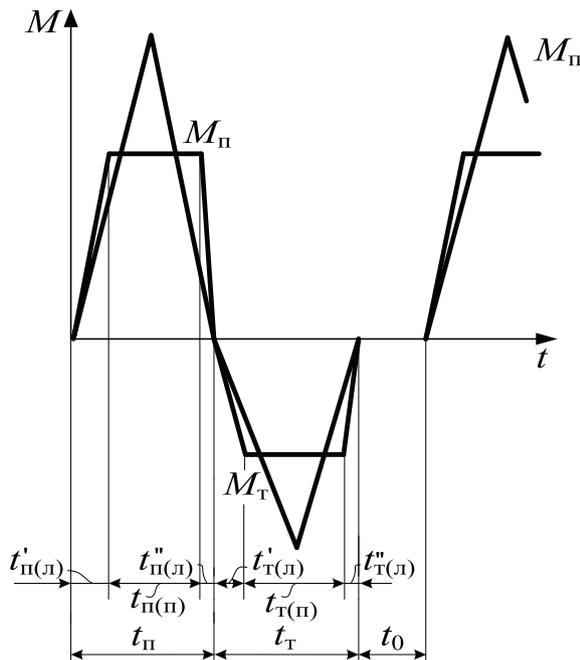


Рис. 3. Трапецеидальные и треугольные диаграммы пусковых и тормозных режимов

Для треугольной нагрузочной диаграммы при значениях кратностей максимальных пусковых и тормозных моментов $\psi_{п}^{max} = \psi_{т}^{max} = \psi_{(асим)}^{max}$ эквивалентная нагрузка равна

$$\psi_0^2 = \frac{(\psi_{(асим)}^{max})^2}{3} = \frac{1}{\xi_0}.$$

Кратность максимального момента

$$\psi_{(асим)}^{max} = \sqrt{3/\xi_0}. \quad (4)$$

Относительно диаграммы с постоянным значением моментов (рис. 1) допустимая перегрузка возросла в $\sqrt{3}$ раза.

При графике скорости симметричной формы

$$\psi_{0(сим)} = \sqrt{((\psi_{п0(сим)} - \psi_c)^2 + \psi_c^2)/3} = \sqrt{1/\xi_0}$$

кратность пускового момента двигателя

$$\psi_{п0(сим)} = \sqrt{3/\xi_0 - \psi_c^2} + \psi_c.$$

Максимальное значение кратности пускового момента $\psi_{п0(сим)}^{max}$ имеет место при $\psi_c = 1/\sqrt{1/2\xi_0}$ и составляет $\psi_{п0(сим)}^{max} = \sqrt{6/\xi_0}$ или $\psi_{п0(сим)}^{max} \approx 1,41\psi_{п0(асим)}^{max}$.

По отношению к диаграмме с постоянным значением моментов (рис. 1) допустимая перегрузка увеличится в $\sqrt{3}$ раза при аналогичном увеличении статической нагрузки. При сохранении ψ_c на уровне равном $\psi_c = 1/\sqrt{1/2\xi_0}$ увеличение составит 1,62 раза.

В трапецеидальных диаграммах совмещены нагрузки с постоянной величиной и изменяющейся по линейному закону. Кратность эквивалентного момента в этом случае определяется из выражения

$$\begin{aligned} \psi_0 &= (\psi_{(асим)}^{max}) \sqrt{\frac{\frac{1}{3}(t_{п(л)} + t_{т(л)}) + t_{п(п)} + t_{т(п)}}{t_{п} + t_{т}}} = \\ &= (\psi_{(асим)}^{max}) \sqrt{\frac{(t_{п} + t_{т}) - \frac{2}{3}t_{(л)}}{t_{п} + t_{т}}} = \\ &= (\psi_{(асим)}^{max}) \sqrt{1 - \frac{2}{3}\tau_{(л)}} = \sqrt{\frac{1}{\xi_0}}, \end{aligned}$$

где $t_{п(л)} = t'_{п(л)} + t''_{п(л)}$, где $t_{т(л)} = t'_{т(л)} + t''_{т(л)}$ – длительности пуска и торможения на участках с линейно изменяющейся нагрузкой; $t_{п(п)}$, $t_{т(п)}$ – соответственно длительности участков с постоянной величиной моментов; $t_{(л)} = t_{п(л)} + t_{т(л)}$ – общее время участков с линейной нагрузкой; $\tau_{(л)} = t_{(л)}/(t_{п} + t_{т})$ – относительная длительность наклонных участков.

Максимальная кратность переходных процессов при таких диаграммах находится между допустимыми значениями образующих форм графиков и зависит от отношения длительностей их действия

$\psi_{(асим)}^{max} = \sqrt{\frac{3}{\xi_0(3 - 2\tau_{(л)})}}$. Так при $\tau_{(л)} = 0$ $\psi_{(асим)}^{max}$ соответствует значению (3); при $\tau_{(л)} = 1$ $\psi_{(асим)}^{max}$ – условию (4).

Выводы

Основными факторами, влияющими на формирование переходных процессов при работе механизма в двухпериодном скоростном режиме движения, являются: относительная продолжительность включения, форма скоростного графика и

характер изменения динамических моментов. Каждому варианту переходных процессов, соответствует оптимальный нагрузочный режим двигателя.

Для графика скорости, реализуемого при $M_{п(асим)} = M_{т(асим)}$, допустимая величина пускового и

тормозного моментов не зависит от статической нагрузки и соответствует области значений $(\sqrt{1/\xi}, \sqrt{3/\xi})M_{п}$.

В случае, когда пуск и замедление осуществляются при равных ускорениях, оптимальное значение пускового момента составляет $M_{п0(сим)}^{max} \approx 1,41 M_{п0(асим)}^{max}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.

2. Иванченко Ф.К. Динамика и прочность прокатного оборудования. – М.: Металлургия, 1970. – 487 с.

Поступила 23.12.2009 г.

УДК 621.3.07

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

С.В. Ланграф, А.И. Сапожников, А.С. Глазырин, Л.Е. Козлова, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев

Томский политехнический университет

E-mail: epeo@elti.tpu.ru

Проведён сравнительный анализ динамики электропривода с классическим и нечётким регуляторами, показаны преимущества применения нечёткой логики в автоматическом регулировании электроприводами.

Ключевые слова:

Динамика электропривода, нечёткая логика, нечёткий регулятор, фаззификация, дефаззификация.

Key words:

Dynamics of drive, fuzzy logic, fuzzy controller, fuzzification, defuzzification.

С развитием производства и появлением новых технологий ужесточаются требования, предъявляемые к электроприводам постоянного тока. Современные технологические процессы требуют разработки электроприводов, имеющих повышенную быстроту реакции, точность и способность к быстрой адаптации при изменении режимов работы.

В последнее время в мировой практике начинают применяться новые нетрадиционные методы управления, включающие нечёткую логику, нейронные сети, экспертные системы и другие управляющие средства с элементами искусственного интеллекта.

В данной статье произведено исследование следящего электропривода (СЭП) с различными системами управления. На примере комплектного электропривода подачи металлорежущего станка модели ИС500ПМФ4 выполнена сравнительная оценка функционирования стандартной трёхконтурной системы управления с обычными регуляторами и системы управления с нечётким регулятором.

Следящий электропривод подачи металлорежущего станка модели ИС500ПМФ4 выполнен на базе комплектного электропривода подачи ЭПУ1-24047П УХЛ4, включающего высокомоментный электродвигатель типа 2ПБВ132МУХЛ4. Настройка системы автоматического управления

(САУ) СЭП на третью точку для структуры СЭП типа 2а с П-регулятором положения рассчитана по методике, изложенной в [1].

Для многих промышленных процессов сложно обеспечить точное управление так как они обычно являются многомерными, нелинейными и изменяющимися во времени. Управление на основе нечёткой логики может успешно применяться для таких процессов. Кроме того, нечёткие регуляторы могут работать с неполоностью описанными системами с неизвестной динамикой, так как для них (в отличие от многих традиционных адаптивных регуляторов) не требуется априорная математическая модель объекта управления. Ещё одно преимущество нечётких регуляторов состоит в том, что они могут быть легко реализованы на цифровых или аналоговых микросхемах, в которых информация может передаваться по параллельно-распределённой схеме.

Применительно к исследуемой САУ СЭП, в качестве объекта управления следует рассматривать контур тока и механическую часть электропривода в стандартной структуре (тиристорный преобразователь и якорную цепь электродвигателя). Для устранения влияния обратной связи по ЭДС в систему введена компенсационная положительная обратная связь.