

АЛГОРИТМ РАСЧЁТА МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ. ВЕРИФИКАЦИЯ УТОЧНЁННОГО МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА

Полилов Е.В., к.т.н., доц.

Донбасский государственный технический университет

94204, Луганская область, г. Алчевск, пр. Ленина, 16

E-mail: egor.polilov@mail.ru

В статті представлено новий алгоритм розрахунку потужності двигунів позиційних електроприводів, заснований на уточненому методі гранично допустимого часу роботи механізму. Запропонований метод вигідно відрізняється від існуючих своєю суворою аналітичністю й структурованістю, а також можливістю гарантованого забезпечення конкретних технологічних вимог, а саме, можливістю відпрацювання електроприводом програмних переміщень за час, що не перевищує гранично допустимий час, обумовлений технологією роботи кожного конкретного механізму. На прикладі електроприводу натисних гвинтів реверсивних станів гарячої прокатки, здійснено верифікацію запропонованого методу.

Ключові слова: позиційний електропривод, середньоквадратичний струм, час відпрацювання переміщення.

In paper the new algorithm of account of power of electric motors of the position electric drives, grounded on the specified method of a maximum-permissible time in use of the mechanism is presented. The offered method favourably differs from existing the strict analyticity and structure, and also possibility of the secured security of concrete technology requirements, namely possibility of working off by the electric drive of programm disalignments in time, not exceeding the maximum permissible time caused by technics of operation of each concrete mechanism. On an instance of the electric drive of pressing screws of reversing mills of a hot rolling verification of the offered method is realised.

Keywords: the position electric drive, mean square current, time of working off of disalignment

Введение. Расчёт эквивалентного тока, момента или мощности электродвигателей позиционных электроприводов, работающих в повторно-кратковременном режиме по программе заданных перемещений, может быть выполнен с использованием существующих методов [1-3], а именно метода построения вспомогательных кривых $t = f(S)$ для определения времени движения, метода эквивалентных ускорений, метода средних перемещений (методик проф. Зеленова А.Б.), либо двух различных методов предельно допустимого времени работы механизма (методик проф. Коцюбинского В.С. и доц. Полилова Е.В. соответственно).

Метод построения вспомогательных кривых $t = f(S)$ используется при расчётах эквивалентного тока и момента предварительно выбранного двигателя. Этот способ эффективен только для треугольных тахограмм. В случае работы электропривода по трапецидальной тахограмме расчёт ещё более усложняется, особенно тогда, когда необходимо выполнить несколько расчётных вариантов, требующих построения серии вспомогательных кривых.

Методы эквивалентных ускорений и средних перемещений позволяют определить эквивалентную нагрузку двигателя позиционного электропривода по аналитическим формулам без построения нагрузочных диаграмм, что значительно сокращает время, расходуемое на проектирование. Несмотря на указанное преимущество данных методов, они всё же

являются методами последовательных приближений, поскольку все расчёты выполняются для предварительно выбранного двигателя и все итерации заключаются в поиске величины кратности пускатормозных моментов, обеспечивающей одновременно допустимый нагрев и ускорение электропривода. Кроме того, метод средних перемещений является упрощённым, поскольку при его разработке не учитывалось влияние статической нагрузки электропривода и реальные перемещения исполнительного органа заменены некоторым средним перемещением за одно включение.

Существующий метод предельно допустимого времени работы механизма [2] позволяет рассчитать мощность двигателя позиционного механизма по технологическим требованиям и тепловой нагрузке одновременно. Однако он обладает рядом существенных недостатков, основные из которых перечислены, например, в работе [3], где показано, что автор методики безосновательно, а возможно и неосознанно подменяет понятия времени отработки критического перемещения на предельно-допустимое по технологии время отработки заданных перемещений; на начальном этапе проектирования закладывает конкретные «с потолка взятые» величины продолжительности включения механизма и т.п., что конечно же абсолютно недопустимо.

Цель работы. Основной целью проведенных в данной работе исследований является разработка эффективных методов расчёта потребной мощности

двигателей позиционных электроприводов по заданным технологическим требованиям.

Материал и результаты исследований. Вопреки сложившемуся мнению о том, что именно установившаяся скорость $V_{уст}$ осевого перемещения нажимных винтов является априори заданной технологами и по которой безапелляционно следует выбирать номинальную скорость приводных электродвигателей, автор статьи имея многолетний опыт работы на прокатных станах Алчевского металлургического комбината после детального изучения технологического процесса прокатки металла может утверждать, что указанная величина на самом деле не является и не может являться «стартовой» при выборе электрических машин. Да, несомненно, для того, чтобы обеспечить некую установившуюся скорость $V_{уст}$ осевого перемещения нажимного винта, необходимо при имеющихся величинах шага нарезки нажимного винта h и передаточного числа редуктора i_p иметь номинальную скорость привод-

ных электродвигателей $\omega_n \geq V_{уст} \frac{2\pi i_p}{h}$. Но всё дело

то в том, что искомая скорость $V_{уст}$ должна обоснованно выбираться исходя из обеспечения заданного режима обжаты (отработки заданной программы перемещений) во времени, а не наоборот. Иными словами, именно величины допустимого времени Δt_i отработки каждого i -го программного перемещения, а также сами величины этих перемещений S_i являются основополагающими при расчёте/выборе потребной мощности позиционного электропривода и должны быть жёстко согласованы со скоростными режимами и технологией прокатки на стане. Вполне понятно, что нажимное устройство, являясь вспомогательным механизмом, не должно лимитировать работу прокатного стана.

Допустимое время Δt_i отработки каждого i -го программного перемещения (изменения раствора валков) по сути определяется временем пауз между пропусками, и металл в валки раньше, чем за время реверса прокатной клетки от скорости выброса металла из валков до захвата его валками не попадёт, что обусловлено рядом факторов - необходимостью кантовки прокатываемого металла, инерционностью выбрасываемого из клетки слитка, профессионализмом операторов главных постов, быстродействием САР электроприводов смежных механизмов и т.п. Опираясь на опыт наладки и эксплуатации электроприводов нажимных устройств, можно сказать, что на большинстве прокатных станах кратность пускотормозных токов/моментов в процессе наладки систем регулирования силовых преобразователей вообще без должного на то обоснования выбирается, как правило, равной 1,5 (судя по всему, логика здесь одна - полутора кратный ток/момент больше чем номинальный и 1,5 кратно 0,5). Так, на данный момент как в черновой, так и чистовой клетях толсто-

листвого стана 3000 Алчевского металлургического комбината при установленной мощности приводных электродвигателей нажимных винтов по 400 кВт каждый, все заданные перемещения верхнего валка на стане 3000 отрабатываются за время $1,5 \div 2,5$ сек. Очевидно, что если попытаться установить мегаваттные электродвигатели, при этом время сократится до 0,5 сек, но вопрос - кому это нужно, ведь производительность стана от этого всё равно не изменится. Иными словами, если говорить фактами цифр, после анализа скоростных диаграмм электроприводов главного движения и нажимных устройств как черновой, так и чистовой клетей толстолиствого стана 3000 (анализировался месячный архив, хранящийся на ИВА-сервере), в том числе как это следует из диаграмм, представленных на рис. 1, можно сказать, что от момента выброса металла из валков до его захвата проходит в среднем $4,5 \div 6,0$ сек. За это время прокатный стан реверсируется до скорости захвата, слиток при необходимости кантуется и прижимается по правой кромке, выставляется необходимый зазор между прокатными валками. Так вот именно это время (не абсолютную величину $4,5 \div 6,0$ сек, разумеется, для другого прокатного стана она будет иной, а именно технологическое время пауз между пропусками) и предлагается использовать в качестве допустимого для отработки программных перемещений верхнего валка электромеханическим нажимным устройством. На самом деле, указанная величина может и не являться оптимальной с позиций минимума потерь электроэнергии в позиционном электроприводе при отработке заданных перемещений - это просто предельно-допустимое по технологии время позиционирования верхнего валка. Вопросы энергосбережения и оптимизации потерь электроэнергии в позиционных электроприводах автором рассматривались ранее в соответствующем цикле статей [4-5] и в этой работе повторяться не будут. Будем полагать, что в результате подобной оптимизации могут найдены некие величины оптимального времени $\Delta t_{i\text{ опт}}$ отработки каж-

дого i -го программного перемещения. Полученные величины следует сравнить с предельно-допустимым по технологии временем позиционирования верхнего валка и в случае, если $\Delta t_{i\text{ опт}} \leq \Delta t_{i\text{ доп}}$, то $\Delta t_i = \Delta t_{i\text{ опт}}$, иначе $\Delta t_i = \Delta t_{i\text{ доп}}$. При выборе мощности приводных электродвигателей рекомендуем предварительно определить долю мощности электрических машин, расходуемую исключительно «на механику» без учёта инерционности (момента инерции) якоря/ротора самих машин, поскольку эта величина при проектировании «с нуля» и до окончательного выбора электродвигателей, как правило, неизвестна. Также можно искомыми величинами определять и в функции $J_{дв}$ с последующим построением зависимостей $P_{н\text{ треб}}(J_{дв})$ и $\lambda_{пт}(J_{дв})$, что конечно же более наглядно.

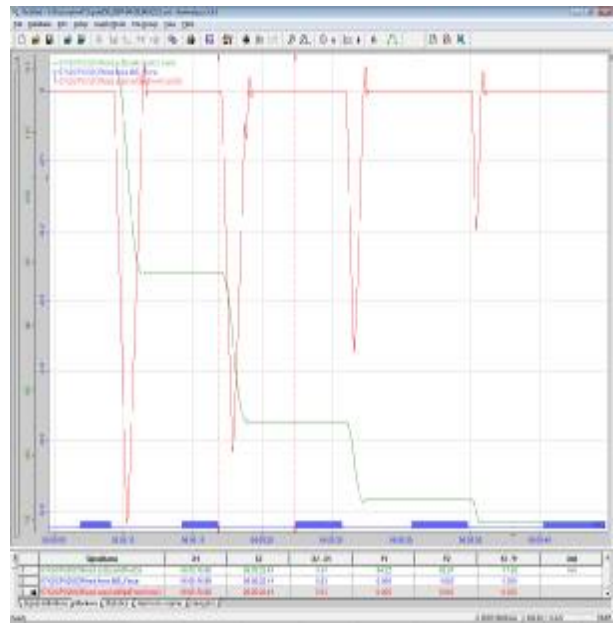
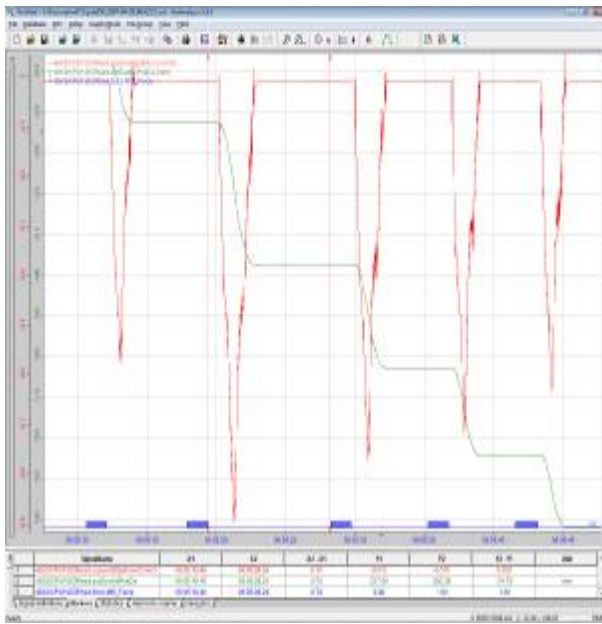


Рисунок 1 – Скорость перемещения нажимных винтов, зазор между прокатными валками, выставяемый электромеханическим устройством, сигнал наличия металла в валках для черновой и чистой клетей

Для каждого программного перемещения S_i и соответствующего ему максимально-допустимого времени обработки Δt_i рассчитываются величины максимумов скорости (вершин треугольников), при условии, что все перемещения будут отработаны по треугольным тахограммам с различными темпами разгона/торможения: $V_{i\text{треб}} = \frac{2S_i}{\Delta t_i}$, а также величины эквивалентного ускорения $a_{э_i}$ (для треугольной Δ и трапецидальной * тахограмм движения соответственно) при условии ограничения установившейся скорости $V_{уст}$ осевого перемещения нажимных винтов:

$$\begin{cases} a_{э_i\Delta} = \frac{4S_i}{\Delta t_i^2}, \text{ при } \frac{2S_i}{\Delta t_i} \leq V_{уст}; \\ a_{э_i*} = \frac{V_{уст}^2}{\Delta t_i V_{уст} - S_i}, \text{ при } \frac{2S_i}{\Delta t_i} > V_{уст}. \end{cases} \quad (1)$$

Эти расчёты удобно свести в соответствующую таблицу. Здесь и далее величину $V_{уст}$ рекомендуем выбирать как некую усреднённую по отношению к максимумам треугольников скорости, т.е.

$$V_{уст} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{i\text{треб}}. \text{ Следует отметить, что это пред-}$$

ложение не является единственно верным, принципиально можно попытаться оптимизировать и эту величину из условия минимума потерь электроэнергии в электроприводе, например, как это сделано в работе [5] при изменении тахограммы движения исполнительного органа позиционного электропривода с треугольной на трапецидальную с меньшей скоростью $V_{уст*} < V_{\text{max}\Delta}$ при условии равенства времени позиционирования.

Из полученных величин $a_{э_i}$ выбирается максимальная $a_{э\text{max}} = \max(a_{э_i\Delta}, a_{э_i*})$, по которой рассчитывается время $\Delta t_{S_{кр}}$ обработки критического перемещения и собственно величина критического перемещения $S_{кр}$ (перемещения, при котором величина вершины треугольника линейной скорости осевого перемещения нажимных винтов достигает установившегося значения):

$$\Delta t_{S_{кр}} = 2V_{уст} / a_{э\text{max}}; S_{кр} = V_{уст}^2 / a_{э\text{max}}.$$

Определяем коэффициенты k_1 и k_2 долевого содержания перемещений соответственно больших и меньших критического в общей программе перемещений:

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^m S_i - mS_{кр}}{mS_{кр} + \sum_{i=1}^m S_i + 2\sqrt{S_{кр}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i}}; \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{S_{кр}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i} + mS_{кр}}{mS_{кр} + \sum_{i=1}^m S_i + 2\sqrt{S_{кр}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i}}, \quad (3)$$

в которых для определения $\sum_{i=1}^m S_i$ учитываются

только те перемещения, для которых S_i (t - количество перемещений, больших критического); а для определения $\sum_{i=1}^q \sqrt{S_i}$ суммирование производится

для перемещений $S_i < S_{кр}$ (q - количество перемещений, меньших критического).

Фактическая продолжительность включения приводных электродвигателей:

$$\varepsilon = \frac{\sum t_i}{t_{ц}} = \frac{mS_{кр} + \sum_{i=1}^m S_i + 2\sqrt{S_{кр}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i}}{V_{уст} t_{ц}}, \quad (4)$$

где $t_{ц}$ - время цикла работы механизма, сек.

Пересчетный коэффициент ξ , учитывающий постоянные потери в электродвигателе и ухудшение условий охлаждения в неустановившихся процессах и в периоды пауз определяется по формуле:

$$\xi = \sqrt{1 + \frac{(\varepsilon_k - \varepsilon)(\alpha + 1)}{\varepsilon \left(\frac{\varepsilon}{\beta} - \varepsilon_k + 1 \right)}} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_k}{\varepsilon}}, \quad (5)$$

где ε_k - каталожная продолжительность включения двигателя; α , β - коэффициенты потерь и ухудшения вентиляции соответственно.

Номинальная требуемая мощность (суммарная мощность электрических машин) позиционного электропривода, приведенная к величине каталожной продолжительности включения ε_k и величина кратности пуско-тормозных токов/моментов $\lambda_{п.т}$, обеспечивающие работу электродвигателя без перегрева для случая стабилизации динамического момента электропривода (с применением в системе управления задатчика траектории равноускоренного движения с единым темпом разгона/торможения):

$$P_{н\text{треб}} = \frac{J'_{\Sigma} \omega_H^2}{\Delta t_{S_{кр}} \xi} \sqrt{8k_2 + \left(\frac{\Delta t_{S_{кр}} M_c}{J'_{\Sigma} \omega_H} \right)^2}; \quad (6)$$

$$\lambda_{п.т} = k_{загр} \sqrt{\frac{\xi^2 - \left(\frac{M_c \omega_H}{P_{н\text{треб}}} \right)^2}{2k_2}}, \quad (7)$$

где $k_{загр}$ - коэффициент загрузки электродвигателя, величина которого численно равна отношению номинальной требуемой мощности $P_{н\text{треб}}$ к установленной P_H . Здесь эта величина может либо задаваться, например, в пределах $0,75 \div 0,9$ при выборе электродвигателей, либо рассчитываться при проверке установленной мощности машин по нагреву.

Выбираемый/установленный электродвигатель должен иметь перегрузочную способность $\lambda_{доп}^{\max}$ по току, соответствующую следующему условию:

$$\lambda_{доп}^{\max} \geq \frac{1}{P_H} \left(\frac{2J'_{\Sigma} \omega_H^2}{\Delta t_{S_{кр}}} + M_c \omega_H \right). \quad (8)$$

Номинальная требуемая мощность позиционного электропривода, приведенная к величине каталожной продолжительности включения ε_k и величина кратности пуско-тормозных токов/моментов $\lambda_{п.т}$ (это по сути ток упора в контуре регулирования то-

ка), обеспечивающие работу электродвигателя без перегрева для случая стабилизации момента электродвигателя определяются следующими формулами:

$$P_{н\text{треб}} = \frac{J'_{\Sigma} \omega_H^2}{\Delta t_{S_{кр}} \xi} \sqrt{(k_1 + 2k_2) \gamma^2 + 4k_2 \left(1 + \sqrt{1 + \gamma^2} \right)}; \quad (9)$$

$$\lambda_{п.т} = k_{загр} \sqrt{\frac{\xi^2 - \left(\frac{M_c \omega_H}{P_{н\text{треб}}} \right)^2}{2k_2}}, \quad (10)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{\Delta t_{S_{кр}} M_c}{J'_{\Sigma} \omega_H}.$$

Выбираемый/установленный электродвигатель должен иметь перегрузочную способность $\lambda_{доп}^{\max}$ по току больше, либо равную $\lambda_{п.т}$. Кроме того, обязательным является выполнение условия $\lambda_{п.т} > M_c^*$ для возможности реализации движущего момента.

Для случая, когда все программные перемещения меньше критического полученные формулы упрощаются. Так, при стабилизации момента электродвигателя:

$$P_{н\text{треб}\Delta} = \frac{J'_{\Sigma} \omega_H^2}{\Delta t_{S_{кр}} \xi} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta t_{S_{кр}} M_c}{J'_{\Sigma} \omega_H} \right)^2} \right); \quad (11)$$

$$\lambda_{п.т\Delta} = k_{загр} \xi, \quad (12)$$

Выбираемый/установленный электродвигатель должен иметь перегрузочную способность $\lambda_{доп}^{\max}$ по току больше, либо равную $\lambda_{п.т\Delta}$.

То же при стабилизации динамического момента электропривода:

$$P_{н\text{треб}\Delta} = \frac{J'_{\Sigma} \omega_H^2}{\Delta t_{S_{кр}} \xi} \sqrt{4 + \left(\frac{\Delta t_{S_{кр}} M_c}{J'_{\Sigma} \omega_H} \right)^2}; \quad (13)$$

$$\lambda_{п.т\Delta} = k_{загр} \sqrt{\xi^2 - \left(\frac{M_c \omega_H}{P_{н\text{треб}\Delta}} \right)^2}. \quad (14)$$

Выбираемый/установленный электродвигатель должен иметь перегрузочную способность $\lambda_{доп}^{\max}$ по току, соответствующую условию (8).

Для построения графиков тока и скорости приводных электродвигателей за цикл работы механизма необходимо рассчитать реальное время обработки заданных перемещений (естественно, оно изменяется по отношению к используемому в предварительных расчётах Δt_1 , поскольку в конечном итоге в САР закладывается единый темп разгона/торможения $a_{\rightarrow \max}$):

$$\Delta t_{\text{вкл}i} = \frac{2}{\sqrt{a_{\text{эmax}}}} \sqrt{S_i}, \text{ при } S_i \leq S_{\text{кр}}; \quad (15)$$

$$\Delta t_{\text{вкл}i} = \frac{2}{\sqrt{a_{\text{эmax}}}} \sqrt{S_{\text{кр}}} + \frac{S_i - S_{\text{кр}}}{V_{\text{уст}}}, \text{ при } S_i > S_{\text{кр}}.$$

Легко убедиться, что полученные значения $\Delta t_{\text{вкл}i} \leq \Delta t_i$. Это условие априори выполняется, следовательно нажимное устройство с закладываемыми в САР электропривода расчётными уставками пуско-тормозных токов/моментов не будет лимитировать работу прокатного стана.

Для оценки коорректности полученных результатов вычислений рекомендуем дополнительно проверить их существующими методами эквивалентных ускорений [1]:

$$M_{\text{ПК}}^{\text{ЭК}} = \left[\frac{1}{a_{\text{п}} + a_{\text{т}}} (a_{\text{т}} M_{\text{п}}^2 + a_{\text{п}} M_{\text{т}}^2) \times \left\{ \left(\sqrt{S_{\text{кр}}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i} + m S_{\text{кр}} \right) + M_c^2 \left(\sum_{i=1}^m S_i - m S_{\text{кр}} \right) \right\} \right] \cdot \frac{1}{\xi}, \quad (16)$$

$$M_{\text{ПК}}^{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}}, \quad (17)$$

а также методом эквивалентных величин по среднеквадратичному моменту (эквивалентному току в якоре) с промежуточным построением нагрузочных диаграмм и тахограмм движения электропривода:

Автором метода на основе представленного алгоритма, а также разработанных ранее алгоритмов расчёта потребной мощности позиционного электропривода [1-3] создано соответствующее программное обеспечение, позволяющее в интерактивном режиме осуществлять все необходимые вычисления с выдачей промежуточных и конечных результатов, построением таблиц, графиков основных координат электропривода и т.п. Для электропривода нажимных винтов шестнадцати различных прокатных станов была проведена верификация предлагаемого метода. Получено абсолютное (стопроцентное, с точностью до десятого знака после запятой) совпадение результатов вычислений для всех станов по отношению к уже зарекомендовавшим себя методам эквивалентных ускорений и графоаналитического метода эквивалентных величин (расчёт среднеквадратичного тока по предварительно построенной диаграмме тока). Предложенные алгоритмы по инициативе автора уже на протяжении пяти лет с успехом используются в учебном процессе кафедры АЭМС ДонГТУ в курсовом и дипломном проектировании студентов специальности 7.092208.

В заключение рассмотрим пример расчёта потребной мощности электродвигателей нажимных винтов черновой клетки кварто толстолистового стана 3000 Алчевского металлургического комбината для режима прокатки листов 16×2250×18000 мм, (сляб 250×1250×2000 мм, сталь 13Г1С-У). В табл. 1 и 2 приведены исходные данные и расчётные формулы для определения ускорений и критических перемещений, необходимые для дальнейших вычислений. Отметим, что при расчёте эквивалентного ускорения последнего программного перемещения (по сути это обратный ход нажимных винтов) для увеличения скорости перемещения, поток машины может быть ослаблен, например, в два раза.

Таблица 1 - Технические и технологические данные механизма

Шаг нарезки нажимного винта, мм	32
Передаточное число от электродвигателя к нажимному винту, отн. ед.	16,3
Скорость осевого перемещения нажимного винта (наибольшая), мм/с	27
Цикл прокатки листа, с	105
Статический момент на валу двигателя нажимного винта (для бронзовой пяты) при подъёме валков, Н·м	2144
при опускании валков, Н·м	2450
Мощность электродвигателей, кВт	2×400
Номинальная частота вращения, об/мин	1000
Суммарный момент инерции механизма, приведенный к валу одного двигателя нажимного винта, кг·м ²	29,14
Диаграмма перемещений, мм	↓7 ↓7 ↓13 ↓14 ↓14 ↓15 ↓14 ↓14 ↓14 ↓14 ↓12 ↓13 ↓12 ↓11 ↓10 ↑184

Номинальная требуемая мощность электропривода, приведенная к величине каталожной продолжительности включения $e_{\text{к}} = 1,0$ и величина кратности пуско-тормозных токов, обеспечивающие работу электродвигателя без перегрева для случая стабилизации динамического момента электропривода:

$$P_{\text{н треб}}(J_{\text{дв}}) = \frac{J'_{\Sigma}(J_{\text{дв}}) \omega_{\text{н}}^2}{\Delta t_{\text{скр}} \xi} \sqrt{8k_2 + \left(\frac{\Delta t_{\text{скр}} M_c}{J'_{\Sigma}(J_{\text{дв}}) \omega_{\text{н}}} \right)^2} =$$

$$= \frac{J'_{\Sigma}(J_{\text{дв}}) \cdot 31,963^2}{0,77 \cdot 1,561} \sqrt{8 \cdot 0,143 + \left(\frac{0,77 \cdot 2,45 \cdot 10^3}{J'_{\Sigma}(J_{\text{дв}}) \cdot 31,963} \right)^2};$$

$$\lambda_{\text{п.т}}(J_{\text{дв}}, k_{\text{загр}}) = k_{\text{загр}} \sqrt{\frac{\xi^2 - \left(\frac{M_c \omega_{\text{н}}}{P_{\text{н треб}}(J_{\text{дв}})} \right)^2}{2k_2}} =$$

$$= k_{\text{загр}} \sqrt{\frac{1,561^2 - \left(\frac{2,45 \cdot 10^3 \cdot 31,963}{P_{\text{н треб}}(J_{\text{дв}})} \right)^2}{2 \cdot 0,19}},$$

Таблица 2 - Расчёт величин эквивалентных ускорений

S_i , мм	Δt_i , с	$V_{i \text{ треб}} = \frac{2S_i}{\Delta t_i}$, мм/с	$a_{\Delta} = \frac{4S_i}{\Delta t_i^2}$, мм/с ²	$a_{\Delta}^* = \frac{V_{\text{уст}}^2}{\Delta t_i V_{\text{уст}} - S_i}$, мм/с ²	$\Delta t_{\text{расч}_i}$, с
1	7	1	1	1	1
1	7	1	3.111	1	1.087
2	7	2	3.111	2	1.087
3	13	3	5.778	3	1.689
4	14	4	6.222	4	1.789
5	14	5	6.222	5	1.789
6	15	6	10	6	1.89
7	14	7	6.222	7	1.789
8	14	8	6.222	8	1.789
9	14	9	6.222	9	1.789
10	14	10	6.222	10	1.789
11	12	11	8	11	1.589
12	13	12	8.667	12	1.689
13	12	13	8	13	1.589
14	11	14	7.333	14	1.488
15	10	15	6.667	15	1.388
16	184	16	36.8	16	10

где $k_{\text{загр}} = \frac{P_{\text{н треб}}}{P_{\text{н}}}$ - коэффициент загрузки устанавливаемых электродвигателей задаём, к напримеру 50%, 70% и 90% соответственно;

$J'_{\Sigma} (J_{\text{дв}}) = J'_{\text{мех}} + 2J_{\text{дв}} = (1,0 \div 4,0) J'_{\text{мех}}$ - суммарный момент инерции, приведенный к валу электродвигателя; $J_{\text{дв}}$ - момент инерции электродвигателя (пока эта величина неопределена) задаём в диапазоне

$(0 \div 1,5) J'_{\text{мех}}$; $S_{\text{кр}} = \frac{V_{\text{уст}}^2}{a_{\Delta \text{ макс}}} = \frac{9,967^2}{25,904} = 3,835 \text{ мм}$ - расчётная величина критического перемещения исполнительного органа;

$V_{\text{уст}} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{i \text{ треб}} = 9,967$

мм/с - установившаяся осевая скорость перемещения нажимных винтов;

$\Delta t_{S_{\text{кр}}} = \frac{2V_{\text{уст}}}{a_{\Delta \text{ макс}}} = \frac{2 \cdot 9,967}{25,904} = 0,77 \text{ с}$ - время отработки критического перемещения; $a_{\Delta \text{ макс}} = 25,904 \text{ мм/с}^2$ - максимальная потребная величина эквивалентного ускорения в соответствии с табл. 2;

$n_{\text{н}} \geq V_{\text{уст}} \frac{2\pi i_{\text{р}}}{h} \cdot \frac{30}{\pi} = 305,223$ об/мин;

$\xi \approx \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{к}}}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{1,0}{0,228}} = 2,092$ - пересчетный коэффициент, учитывающий постоянные потери в электродвигателе и ухудшение условий охлаждения в неустановившихся процессах и в периоды пауз;

фактическая продолжительности включения двигателя;

$$\epsilon = \frac{mS_{\text{кр}} + \sum_{i=1}^m S_i + 2\sqrt{S_{\text{кр}}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i}}{V_{\text{уст}} t_{\text{ц}}} = \frac{16 \cdot 3,835 + 368 + 2\sqrt{3,835} \cdot 0}{9,967 \cdot 105} = 0,41$$

фактическая продолжительности включения двигателя;

$$k_2 = \frac{\sqrt{S_{\text{кр}}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i} + mS_{\text{кр}}}{mS_{\text{кр}} + \sum_{i=1}^m S_i + 2\sqrt{S_{\text{кр}}} \sum_{i=1}^q \sqrt{S_i}} = \frac{\sqrt{3,835} \cdot 0 + 16 \cdot 3,835}{16 \cdot 3,835 + 368 + 2 \cdot \sqrt{3,835} \cdot 0} = 0,143;$$

$\sum_{i=1}^m S_i = 368 \text{ мм}$ ($m = 16$ - количество перемещений, больших критического); $\sum_{i=1}^q \sqrt{S_i} = 0$ ($q = 0$ - количество перемещений, меньших критического).

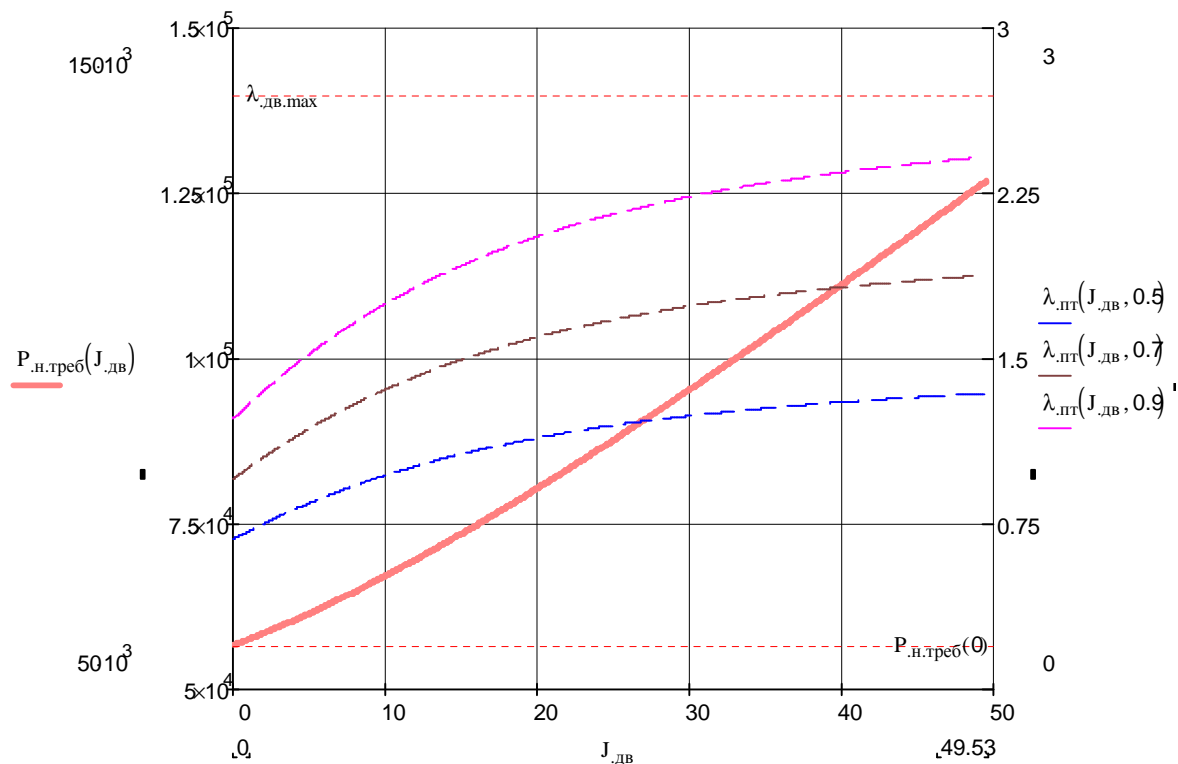


Рисунок 2 – Зависимости $P_{н,тр\text{еб}}(J_{дв})$ и $\lambda_{пт}(J_{дв})$ для различных коэффициентов загрузки электродвигателей 50%, 70% и 90% соответственно

Отметим, что в данном примере ставилась задача именно выбора приводных электродвигателей нажимных винтов для реализации заданной программы перемещений, а не проверки установленных машин по нагреву. Как видно из представленных на рис.2 диаграмм поставленным условиям удовлетворяют электродвигатели суммарной мощностью от 60 до 130 кВт (в зависимости от величины их собственного момента инерции) и номинальной скоростью большей 305,2 об/мин. При этом нагрузка машин по нагреву может быть выбрана заранее, например 90%; кратности $\lambda_{пт}$ пуско-тормозных токов/моментов от 1,3 до 2,3 (естественно, выбирается единая уставка).

Выводы. Автором разработан новый алгоритм расчета мощности двигателей позиционных электроприводов, основанный на уточненном методе предельно-допустимого времени работы механизма, выгодно отличается от существующих своей строгой аналитичностью и структурированностью, а также возможностью гарантированного обеспечения конкретных технологических требований, а именно возможностью отработки электроприводом программных перемещений за время, не превышающее предельно допустимого времени, обусловленного технологией работы каждого конкретного механизма. На примере электропривода нажимных винтов реверсивных станов горячей прокатки осуществлена верификация предложенного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов: Учеб. пособие / А.Б. Зеленев, - К.: УМК ВО, 1990. - 200 с.
2. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учеб. пособие. - Алчевск: ДГМИ, 2002. - 150 с.
3. Полилов Е.В., Зеленев А.Б. Уточненный метод предельно допустимого времени работы механизма, предназначенный для расчёта мощности двигателей позиционных электроприводов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ.- 2005.- Вип. 3/2005 (32). - С. 22 - 26.
4. Полилов Е.В., Зеленев А.Б., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизации потерь в позиционных электроприводах // Одеський національний політехнічний університет. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Електромашинобудування та електрообладнання». - Київ, «Техніка», 2006.- С. 315-319.
5. Полилов Е.В., Зеленев А.Б., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизации потерь в позиционных электроприводах (часть 2) // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ, 2007.- Вип. 3/2007 (44). Частина 2.- С. 82 - 87.

Стаття надійшла 18.04.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.