

УДК 621.86

**ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
ГИДРОПРИВОДА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МОЩНОСТИ**

**О.В. Григоров, проф., д.т.н., В.В. Стрижак, к.т.н., Д.М. Зюбанова, асп.,
М.В. Цебренко, ассист., М.Г. Стрижак, к.т.н.,
Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков**

Аннотация. Обосновано снижение установленной мощности приводного электродвигателя кранового механизма на основе анализа затрат энергии и сопоставления эквивалентной мощности гидростатического привода и асинхронного привода с фазным ротором.

Ключевые слова: экономия энергии, механизм крана, объемный гидропривод.

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА
ГІДРОПРИВОДУ МЕТОДОМ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

**О.В. Григоров, проф., д.т.н., В.В. Стрижак, к.т.н., Д.М. Зюбанова, асп.,
М.В. Цебренко, асист., М.Г. Стрижак, к.т.н.,
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків**

Анотація. Обґрунтовано зменшення встановленої потужності приводного електродвигуна кранового механізму на основі аналізу витрат енергії й зіставлення еквівалентної потужності гідростатичного приводу і асинхронного приводу з фазним ротором.

Ключові слова: економія енергії, механізм крана, об'ємний гідропривід.

**GROUNDING THE REDUCTION OF POWER OF THE HYDRAULIC DRIVE
ELECTRIC MOTOR BY EQUIVALENT POWER METHOD**

**O. Hrygorov, Prof., D. Sc. (Eng.), V. Stryzhak, Ph. D. (Eng.), D. Ziubanova, P. G.
M. Tsebrenko, T. Asst., M. Stryzhak, Ph. D. (Eng.),
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv**

Abstract. The authors have analyzed the power consumption by a hydraulic drive and wound rotor motor of crane mechanisms at all stages of the operational cycle: acceleration, movement at nominal or intermediate speed and deceleration. The decrease of the rated capacity of electric motors is justified.

Key words: energy saving, bridge crane, movement mechanism, power drive, hydrostatic drive.

Введение

Привод крановых механизмов является одним из важнейших элементов машин данного класса. Его тип влияет на энергопотребление, динамические нагрузки и, в конечном итоге, сказывается на капитальных затратах на грузоподъемную машину и удельных затратах на единицу переработанного груза. Традиционным приводом для грузоподъемных ма-

шин является асинхронный двигатель краново-металлургической серии с фазным ротором и реостатным управлением. Его достоинством является относительная простота конструкции системы управления. Несмотря на это, данный привод совершенно не отвечает современным требованиям эффективности потребления энергии и плавности работы. Поэтому решение задачи рационального выбора привода крановых механизмов от-

крывает возможности экономии энергии и снижения динамических нагрузок.

Анализ публикаций

Актуальность рационального выбора приводов подтверждается большим количеством публикаций, посвященных решению этой задачи, и связана с широкими возможностями и разнообразием современных приводных систем [1].

Для обоснования целесообразности применения конкретного типа привода используют следующие критерии: механические характеристики, характеристики переходных процессов, ограничение колебаний крановых электромеханических систем, количество потребляемой электроэнергии, искажение питающей сети, надежность и стоимость привода [2]. Кроме этого, для грузоподъемной техники необходимо учитывать особенности рабочего цикла механизма: группу режима работы и период включения [3].

Множество работ посвящено исследованию эффективности применения частотно-регулируемого и тиристорного приводов по сравнению с асинхронным двигателем с фазным ротором [4]. Данные типы электроприводов получили в последнее время широкое распространение в грузоподъемной технике [5] благодаря их экономичности и быстрой окупаемости [6].

Имеются данные сравнительных исследований частотного привода и асинхронного с короткозамкнутым ротором. Установлено, что применение асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором с повышенным КПД позволяет сэкономить до 3 % энергии по сравнению с обыкновенным, в то время как частотное регулирование – до 15 % [7]. При этом практически не освещенным остается вопрос оценки эффективности применения гидравлического привода крановых механизмов по сравнению с традиционным приводом на основе асинхронного двигателя с фазным ротором. Представляется перспективным производить учет необходимых критериев оценки при помощи метода эквивалентной мощности. Данный метод позволяет учесть режим работы кранового механизма и обосновать уменьшение установленной мощности двигателя, что существенно сказывается на капитальных затратах и дает до-

полнительные преимущества по окупаемости гидропривода.

Цель и постановка задачи

Целью работы является обоснование возможности уменьшения мощности приводного электродвигателя гидропривода крановых механизмов сравнительно со случаем применения для тех же механизмов асинхронного двигателя с фазным ротором.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- провести анализ характера потребления энергии объемным гидроприводом и асинхронным двигателем с фазным ротором при работе механизмов кранов на всех этапах движения: разгон, движение с номинальной или промежуточной скоростью, торможение;
- определить закономерности расчета эквивалентных мощностей для обоих типов приводов и их соотношение;
- установить зависимости изменения соотношения эквивалентных и установленных мощностей для двух типов приводов от группы режима работы механизма крана при различной интенсивности протекания пуско-тормозных процессов и различной скорости установившегося движения

Определение эквивалентных мощностей приводов и их сравнение

Сравнительный анализ характера потребления энергии гидропривода крановых механизмов и традиционного привода на основе электродвигателя с фазным ротором выполнен по результатам экспериментальных исследований на стенде, имитирующем работу механизма передвижения крана с гидроприводом, общий вид которого представлен на рис. 1. Описание конструкции стенда приведено в статье [8].

На стенде имитировалась работа механизма передвижения мостового крана грузоподъемностью 32/5 т, пролет – 22,5 м. Общая масса крана без груза – 43,3 т, масса тележки – 10,632 т; номинальная скорость передвижения крана – 76,5 м/мин; диаметр ходовых колес – 800 мм; привод механизма передвижения крана – отдельный.

Гидравлический привод для такого крана состоит из асинхронного электродвигателя

серии А0, регулируемого насоса ПД, гидромотора ПМ, следящей электронной системы управления производительностью насосов. Традиционный электрический привод на основе асинхронного электродвигателя с фазным ротором включает краново-металлур-

гический электродвигатель серии МТФ. Электродвигатель гидропривода отключается от сети во время пауз между циклами работы механизма передвижения, так как в его постоянной работе нет необходимости.

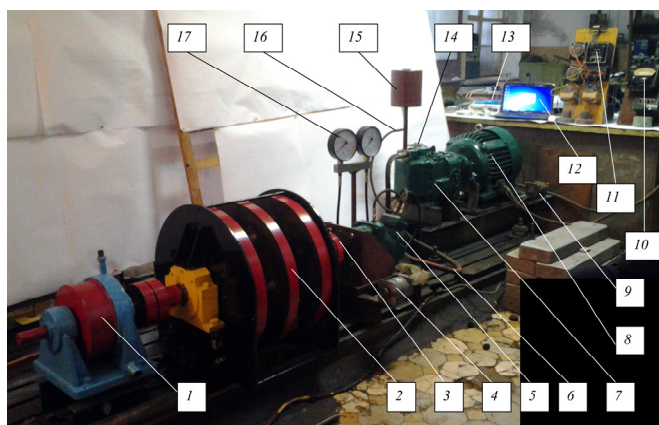


Рис. 1. Общий вид стенда для экспериментального исследования гидропривода механизма передвижения мостового крана: 1 – нагружатель, который охлаждается проточной водой и имитирует статический момент сопротивления передвижению или повороту; 2 – маховые массы для имитации момента инерции вращающихся и поступательно двигающихся масс (имитируются параметры кранов широкого ряда грузоподъемности); 3 – тензорадиодатчики для передачи крутящего момента на усилитель и дальше по беспроводному каналу на аналого-цифровой преобразователь; 4 – тахогенератор ТМГ-30 П для записи скорости вращения гидромотора; 5 – гидромотор ПМ №10; 6 – трубопроводы большого давления; 7 – аксиально-поршневой насос ПД №5; 8 – электродвигатель АО 62-4; 9 – тахогенератор ТМГ-30 П для записи скорости обращения электродвигателя и фиксации его работы в генераторном режиме; 10 – стрелочный ваттметр; 11 – преобразователь мощности П004; 12 – ноутбук; 13 – усилители; 14 – исполняющая часть системы управления; 15 – дополнительный бачок; 16 – трубопровод отвода утечек; 17 – манометры

На рис. 2 приведены схемы изменения параметров приводов в течение рабочего цикла – схематизированные результаты стендовых испытаний гидропривода и теоретическая схема изменения параметров асинхронного двигателя с фазным ротором.

При равномерном разгоне и торможении возникает ряд расхождений в характере изменения параметров приводов. Крутящий момент на валу электродвигателя гидропривода, а следовательно, и ток, который идет на нагревание двигателя, меняются по прямолинейному закону (пропорционально скорости передвижения крана). У обычного электрического привода (асинхронный электродвигатель с фазным ротором) эта величина сохраняет практически постоянное значение на данных этапах рабочего цикла. В связи с этим тепловой режим приводного электродвигателя гидропривода менее напряжен, что

позволяет в ряде случаев снизить установленную мощность приводных электродвигателей.

Поскольку установленная мощность крановых электродвигателей определяется условиями нагрева, необходимо воспользоваться методом эквивалентных мощностей и сравнить их для двух типов приводов при использовании их в разных условиях работы: для групп режимов работы механизмов М1÷М8 (период включения (ПВ) – 15, 25, 40, 60 %) в условиях высокой и низкой интенсивности протекания переходных процессов и при использовании приводов на сниженных скоростях движения ($e = V / V_{ном}$). Рассматриваются также два варианта торможения двигателя электрического привода – противовключением и механическим тормозом. Под высокой интенсивностью протека-

ния переходных процессов имеется в виду режим, при котором обеспечивается ускорение крана $a_y = 0,21 \text{ м/с}^2$, замедление крана $a_3 = 0,41 \text{ м/с}^2$; при низкой интенсивности $a_y = a_3 = 0,1 \text{ м/с}^2$. Режим высокой интенсивности обеспечивается при работе гидромото-

ра и насоса с давлением 160 МПа, что ограничивается настройкой предохранительных клапанов. Режим низкой интенсивности определяется электрическим приводом при плавном переводе контроллера с нулевого положения в крайнее и назад.

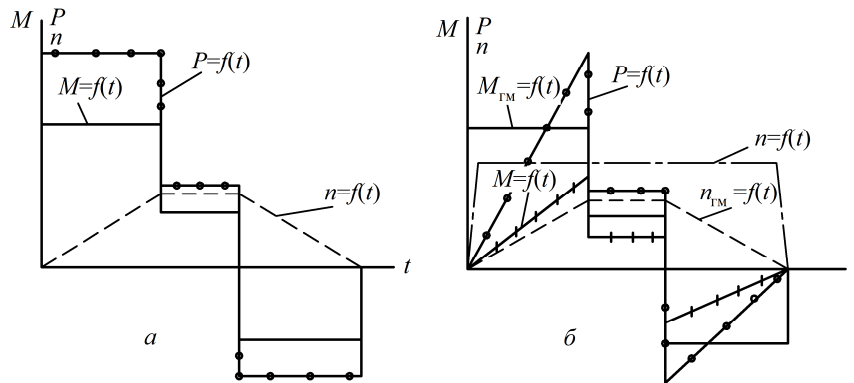


Рис. 2. Графики изменения параметров приводов: а – электрического; б – гидравлического; M, P – крутящий момент и мощность на валу электродвигателя; $n, n_{гм}$ – частоты вращения электродвигателя и гидромотора; $M_{гм}$ – момент на валу гидромотора; t – время

Учитывая работу механизмов передвижения и поворота кранов в режимах разгона, равномерного хода и торможения, выбор мощности приводного электродвигателя целесообразно проводить по эквивалентной мощности P_e за цикл [9]

$$P_e = \sqrt{\frac{\int_0^t P^2 dt}{t}}, \quad (1)$$

где P_e – текущая мощность на валу электродвигателя; t – время.

Исследования показали, что в переходных процессах при линейном изменении параметра регулирования насоса мощность на валу электродвигателя, крутящий момент на его валу, потребляемая и рекуперлируемая мощность, как и ток в статорных обмотках, меняются линейно.

Поэтому в применении к электрогидроприводу, с учетом его работы по трапециевидной тахограмме, выражение (1) может быть представлено в виде

$$P_e = \sqrt{\frac{\frac{1}{3} P_{p.\max}^2 \frac{1}{\eta_{ред}^2 \eta_{г.прив}^2} t_p + P_{p.x}^2 \frac{1}{\eta_{ред}^2 \eta_{г.прив}^2} t_{p.x} + \frac{1}{3} P_{г.\max}^2 \eta_{ред}^2 \eta_{г.прив}^2 \eta_{эл.дв.г}^4 t_{г.т}}{t_p + t_{p.x} + t_{г.т} + \frac{1}{3} \theta}}, \quad (2)$$

где $P_{p.\max}$ – максимальная положительная мощность на валу ходового колеса в конце периода разгона; $P_{p.x}$ – положительная мощность на валу ходового колеса при равномерном движении; $P_{г.\max}$ – максимальная негативная мощность на валу ходового колеса в начальный период генераторного торможения; $\eta_{ред}$ – КПД редуктора в конце периода разгонки, в начале генераторного торможения, при равномерном движении; $\eta_{г.прив}$ – общий КПД гидростатического привода в конце периода разгона, в начале генераторного торможения, при равномерном движении; $\eta_{эл.дв.г}$ – КПД электродвигателя в генераторном режиме работы.

Время t_p разгона и $t_{г.т}$ торможения записано без коэффициента 0,75, что вводится для учета ухудшения условий охлаждения двигателя в обычных электрических приводах в переходных режимах, потому что в гидроприводе электродвигатель в переходных режимах вращается приблизительно с номинальной скоростью без ухудшения условий охлаждения. Коэффициент $1/3$ перед θ показывает, что условия охлаждения двигателя в период паузы, когда он отключается от сети, ухудшаются.

Множитель $\eta_{сл.дв.г}^4$ показывает, что механическая мощность двигателя, который работает как генератор, при одной и той же электрической мощности, которая обуславливает его нагрев, в $1/\eta_{сл.дв.г}^2$ больше механической мощности двигателя при его работе в двигательном режиме [9, 10]. Для электрического привода при разгоне и торможении с постоянными крутящими моментами на валу двигателя выражение для P_e может быть записано в виде

$$P_e = \sqrt{\frac{P_{p.max}^2 \frac{1}{\eta_{ред}^2} t_p + P_{p.x}^2 \frac{1}{\eta_{ред}^2} + P_{п.max}^2 \eta_{ред}^2 \frac{\eta_{п}^2}{\eta_{\sigma}^2} t_{п.т}}{0,75(t_p + t_{м}) + t_{p.x} + \frac{1}{3}\theta}}, \quad (3)$$

где $P_{p.max}$ – максимальная отрицательная мощность на валу ходового колеса в начальный период работы его на противотоке; $t_{п.т}$ – время торможения привода при работе на противотоке; $\eta_{п}$ – КПД двигателя в периоды его работы на противотоке; η_{σ} – КПД статора двигателя, который работает на противотоке.

Выражение (3) получено с учетом того, что в период разгона двигателя и работы его на противотоке под знаком интеграла в формуле (1) указывается мощность, отнесенная к полной скорости передвижения крана [9]. Таким образом, относительно кранового электрического привода мощность на валу электродвигателя условно принимается постоянной не только на участке равномерного хода, но и не меняется во времени на всем участке раз-

гона ($P_{p.max}$) и торможения противовключением ($P_{п.max}$).

Двигатели выбирали по эквивалентной мощности P_e за цикл, проверяли на перегрузочную способность и допустимое число включений в час, после чего по большей из необходимых мощностей определяли установленную мощность. Результаты расчетов для разной интенсивности разгона и торможения, а также для разных видов торможения электрического привода представлены на рис. 3.

Анализируя графики, можно сделать такие выводы. При одинаковых условиях работы эквивалентная мощность гидравлического привода за цикл работы электродвигателя меньше, чем у электрического, что объясняется благоприятными условиями нагрузки электропривода (электродвигатель сначала разгоняется вхолостую, а потом его нагружают) и отсутствием противотокового торможения. Для электрического привода установленная мощность двигателя в исследованных случаях определяется условиями нагрева (кривые P_e и $P_{уст}$ совпадают), то есть величиной P_e . Эта мощность тем больше, чем в более напряженных условиях по режиму работы работает привод.

Установленная мощность электродвигателя гидравлического привода в исследованных случаях определяется, в отличие от электрического привода, перегрузочной способностью электродвигателей серии А0, А02 (прямые $P_{уст}$ для всех ПВ % расположены выше кривых P_e) и не зависят от группы режима работы (прямые 1, 2 расположены параллельно оси группы режима работы).

В исследованных случаях при низкой интенсивности разгона и торможения наличие или отсутствие противотокового торможения не оказывает влияния на величину установленной мощности электрического привода (кривые 3 и 6 совпадают). При высокой интенсивности разгона и торможения применение только механического тормоза ведет к снижению установленной мощности приблизительно на 15 %.

На рис. 4 приведены графики зависимости соотношения установленной мощности двигателей обоих типов приводов от ПВ% (группы режима работы), построенные по данным рис. 3. Отношение $P_{уст.ел} / P_{уст.г}$ дает представление не только о соотношении мощностей, но до некоторой степени о массе, габаритах и других параметрах. Анализируя кривые (рис. 4), можно сделать выводы: наилучшие для гидравлического привода соотношения установленных мощностей выходят при режиме высокой интенсивности разгона и торможения и напряженной по ПВ% эксплуатации (кривые 3, 4, 8, 10). При этом

отношение $P_{уст.ел} / P_{уст.г}$ может достигать 2,5. Наихудшие для гидравлического привода соотношения установленных мощностей отмечаются при низкой интенсивности разгона и торможения, торможении механическим тормозом электрического привода и легком режиме работы по ПВ % (кривые 1, 2, 9). Это объясняется тем, что в этих условиях работы на выбор установленной мощности гидравлического привода решающее значение имеет перегрузочная способность общепромышленных двигателей, которая в 1,3–1,5 раза меньше, чем в краново-металлургических.

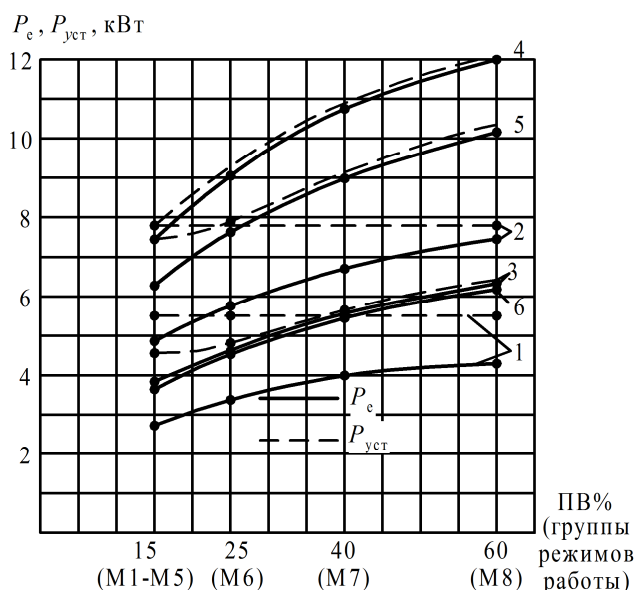


Рис. 3. Графики сравнения установленной и эквивалентной мощности и их отношений для электрического и гидравлического приводов в зависимости от режима работы механизма по ПВ %: $P_e, P_{уст} = f(\text{ПВ} \%)$: 1, 2 – низкая и высокая (соответственно) интенсивность разгона и торможения гидроприводов; 3, 4 – электрический привод, низкая и высокая (соответственно) интенсивность разгона и торможения, торможение противотоком; 5, 6 – электрический привод, высокая и низкая соответственно интенсивность разгона и торможения, торможение механическим тормозом

Сопоставление по эквивалентной мощности показывает, что соотношение $P_{е.ел} / P_{е.г}$ практически не зависит от ПВ %, всегда остается в пользу гидравлического привода и, в зависимости от интенсивности протекания переходных процессов и вида торможения электрического привода, колеблется в пределах 1,3–1,65 (прямые 5, 6, 7). В практике эксплуатации подъемно-транспортных машин есть случаи, когда привод, созданный для работы на определенной номинальной скорости $V_{ном}$, используется на другой скорости ($V < V_{ном}$), например, при недостаточно

большом расстоянии между мостовыми кранами, расположенными в одном пролете. На рис. 5 приведена зависимость $P_{е.ел}, P_{е.г} = f(e)$, где e – отношение текущей скорости к номинальной. Анализ кривых показывает, что эквивалентная мощность электрического привода тем больше, чем меньше используются его скоростные возможности (чем меньше e). Эквивалентная мощность гидравлического привода тем больше, чем больше используются его скоростные возможности. Анализ кривых, приведенных на рис. 6, позволяет сделать следующие выводы:

наилучшие для гидравлического привода соотношения эквивалентных мощностей имеют место при незначительном использовании скоростных возможностей приводов ($e \rightarrow 0$). Это соотношение тем выше, чем выше ин-

тенсивность протекания переходных процессов и чем более напряженным является режим эксплуатации по ПВ %. Так, например, при $e = 0,333$ соотношение $P_{e,эл} / P_{e,г} \approx 22$.

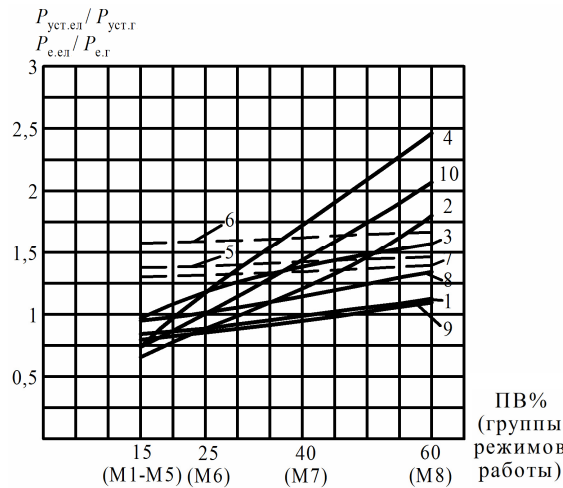


Рис. 4. Графики установленной и эквивалентной мощности и их отношения для электрического и гидравлического приводов в зависимости от режима работы механизма по ПВ% (группы режима работы): 1, 2 – $P_{уст.эл.}, ПВ\% / P_{уст.г}$ – при низкой интенсивности разгона и торможения; 3, 4 – $P_{уст.эл.}, ПВ\% / P_{уст.г}$ – при высокой интенсивности разгона и торможения; 5, 6 – $P_{е.эл.} / P_{е.г}$ – при низкой интенсивности разгона и торможения; 7, 8 – $P_{е.эл.} / P_{е.г}$ – при высокой интенсивности разгона и торможения, торможение электрического привода механическим тормозом; 9, 10 – $P_{уст.эл.}, ПВ\% / P_{уст.г}$ – при низкой и высокой (соответственно) интенсивности разгона и торможения, торможение электрического привода механическим тормозом

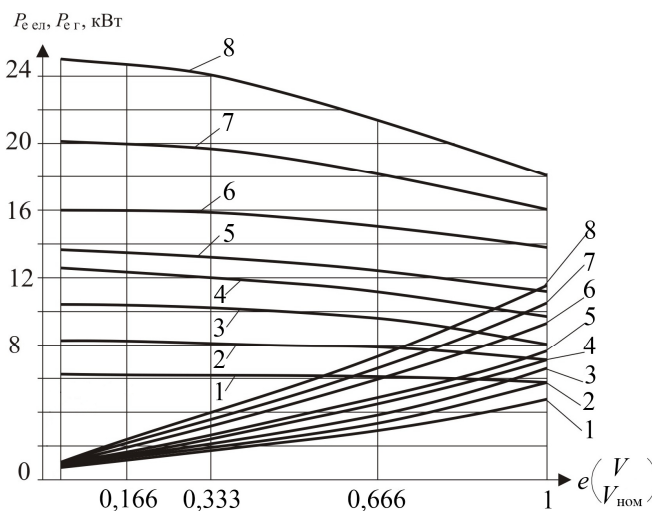


Рис. 5. Графики зависимости эквивалентной мощности $P_{е.эл.}, P_{е.г} = f(e)$ для электромеханического (верхние кривые) и гидравлического (нижние кривые) приводов от относительной скорости: 1 – малая интенсивность разгона и торможения, работа при ПВ = 15 %; 2 – то же при ПВ=25 %; 3 – то же при ПВ = 40 %; 4 – то же при ПВ = 60 %; 5 – высокая интенсивность разгона и торможения, работа при ПВ = 15 %; 6 – то же при ПВ = 25 %; 7 – то же при ПВ = 40 %; 8 – то же при ПВ = 60 %

Наихудшее для гидравлического привода соотношение эквивалентных мощностей наблюдается при полном использовании скоростных возможностей приводов ($e = 1$). При этом для разных условий эксплуатации соотношение $P_{e.эл} / P_{e.г}$ достигает 1,3–1,65, что наблюдалось ранее при изучении прямых 5, 6, 7 на рис. 4, в предположении $e = 1$.

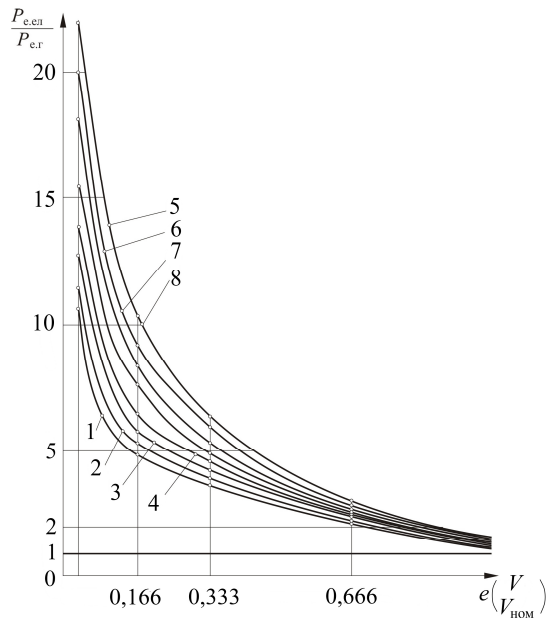


Рис. 6. Графики отношений $P_{e.эл} / P_{e.г} = f(e)$ эквивалентных мощностей для электрического и гидравлического приводов

На основании проведенного исследования можно утверждать, что установленная мощность электродвигателя гидравлического привода при эксплуатации на интенсивных режимах разгона и торможения и напряженных режимах по ПВ % меньше, чем у электрического привода. Аналогичные результаты получаются при проведении расчетов по эквивалентному моменту.

Выводы

В работе обоснована возможность уменьшения мощности приводного электродвигателя гидропривода крановых механизмов по сравнению со случаем применения для тех же механизмов традиционного для крановых приводов асинхронного двигателя с фазным ротором. В ходе исследований решен ряд задач: проведен анализ характера потребления энергии объемным гидроприводом и асинхронным двигателем с фазным ротором,

определены закономерности расчета эквивалентных мощностей для обоих типов приводов и их соотношение, установлены зависимости изменения соотношения эквивалентных и установленных мощностей для двух типов приводов от группы режима работы механизма крана при различной интенсивности протекания пуск-тормозных процессов и различной скорости установившегося движения.

Определены этапы рабочих циклов крановых механизмов, на которых имеется существенное преимущество гидропривода по характеру потребления энергии и, соответственно, по эквивалентной мощности, — разгон и торможение.

Преимущества по эквивалентной мощности электродвигателя гидравлического привода возрастают в случае, если условия эксплуатации определяют недоиспользование скоростных возможностей приводов. При малой интенсивности разгона и торможения и легких режимах работы гидропривод по установленной мощности электродвигателя менее эффективен, чем электрический привод, за счет проигрыша в потреблении энергии в режиме равномерного хода. Результаты проведенных исследований определяют целесообразную среду применения приводов с точки зрения получения максимальных преимуществ по величине эквивалентной и установленной мощности.

Литература

1. Javied T. A Study on Electric Energy Consumption of Manufacturing Companies in the German Industry with the Focus on Electric Drives Original Research Article / T. Javied, T. Rackow, R. Stankalla, C. Sterk, J. Franke // Procedia CIRP. — 2016. — Vol. 41. — P. 318–322.
2. Герасимьяк Р.П. Разработка системы критериев выбора электропривода для крановых механизмов / Р.П. Герасимьяк, С.П. Савич, М.Ю. Шабовта // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — 5/1 (77) 2015. — С. 51–58.
3. Григоров, О. В. Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом / О. В. Григоров, В. В. Стрижак // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. — 2012. — Вып. 57. — С. 249–256.

4. Бушер В.В. Автоматизована система порівняння техніко-економічної ефективності електроприводів кранових механізмів / В. В. Бушер, С. П. Савич, С. Л. Савич, В. С. Медведєв // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – 2/8 (80) 2016. – С. 37–49.
5. Blanusa, B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives / B. Blanusa. – New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems, 2010.
6. Grygorov, O. V. Realization of energy-saving control modes on cranes of great load-carrying capacity / O. V. Grygorov, Y. I. Zaytsev, V. P. Svirgun, V. V. Stryzhak // Annals of the University of Petrosani : Mechanical Engineering – 2010. – Vol. 12. – P. 111–118.
7. E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler und J. Strauch, Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
8. Григоров О.В. Стенд для дослідження регульованого об'ємного привода пересування й повороту / О.В. Григоров, В.В. Стрижак, Д.М. Зюбанова, М.Г. Стрижак // Підйомно-транспортна техніка: науково-технічний та виробничий журнал. Одеський національний політехнічний університет. – 2013. – № 3(39). – С. 65–68.
9. Григоров О.В. Рациональні приводи підйомно-транспортних, дорожніх машин та логістичних комплексів: монографія / О.В. Григоров, В.В. Стрижак, Н.О. Петренко та ін.; за ред. Григорова О.В. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – 352 с.
10. Hryhorov O. V., Stryzhak V. V. *Analiz pusko-hal'mivnykh protsesiv kranovykh mekhanizmiv z chastotno-rehul'ovanyim pryvodom* [Analysis of starting and braking processes crane mechanisms with variable-speed drive]. Vestnyk KhNADU. 2012. vol. 57. pp. 249–256.
11. Busher V.V., Savych S.P., Savych S.L., Medvedyev V. S. *Avtomatyzovana systema porivnyannya tekhniko-ekonomichnoyi efektyvnosti elektropryvodiv kranovykh mekhanizmiv* [Automated system for comparing technical and economical efficiency electric crane mechanisms]. *Vostochno-Evropeysky zhurnal peredovykh tekhnolohyy*. 2016. 2/8 (80) 2016. pp. 37–49.
12. Blanusa, B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems, 2010.
13. Grygorov O.V. Zaytsev Y.I., Svirgun V.P., Stryzhak V. V. Realization of energy-saving control modes on cranes of great load-carrying capacity Annals of the University of Petrosani: Mechanical Engineering. 2010. vol. 12. pp. 111–118.
14. Müller E., Engelmann J., Löffler T., Strauch J. Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben [Plan and operate energy efficient factories] Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
15. Hryhorov O.V., Stryzhak V.V., Zyubanova D.M., Stryzhak M.H. *Stend dlya doslidzhennya rehul'ovanoho ob'yemnoho pryvoda peresuvannya y povorotu* [Stand for investigation of volume-regulated drive movement and rotation]. *Pidyomno-transportna tekhnika, Odes'kyi natsional'nyy politekhnichnyy universytet*, 2013. no. 3(39). pp. 65–68.
16. Hryhorov O.V. *Ratsional'ni pryvody pidynomno-transportnykh, dorozhnykh mashyn ta lohistychnykh kompleksiv: monografiya* [Rational drives handling, road machines and logistic systems] Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2016. 352 p.

References

1. Javied T.A., Rackow T., Stankalla R., Sterk C., Franke J. Study on Electric Energy Consumption of Manufacturing Companies in the German Industry with the Focus on Electric Drives Original Research Article Procedia CIRP. 2016. Vol. 41. pp. 318–322.
2. Gerasimyak R.P., Savich S.P., Shabovta M. Yu. *Razrabotka sistemy kriteriev vybora elektroprivoda dlya kranovykh mekhanizmiv* [Development of a system of criteria for selecting an electric drive for crane mechanisms]. *Vostochno-Evropeyskiy zhur-*

Рецензент: Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.