

УДК 621.3.016.34, 62-529

### УПРАВЛЕНИЕ ТРОГАНИЕМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРУЗОПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА

**О. А. Хребтова, В. В. Ченчевой, А. И. Гладырь**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: 34092@ukr.net

Для повышения в 2–5 раз кратности пускового момента асинхронного двигателя предложен способ определения требуемых значений напряжения и частоты источника питания на базе частотно-регулируемого асинхронного электропривода с учетом нелинейности кривой намагничивания. Применение регрессионной модели, отображающей полиномиальную зависимость пускового момента и тока от амплитуды и частоты питающего напряжения, позволяет рассчитать значения напряжения и частоты источника питания для получения заданного или максимально допустимого пускового момента с минимальным пусковым током. На базе предложенной структуры автоматизированной системы управления частотно-регулируемым электроприводом разработан алгоритм трогания асинхронного электропривода технологического объекта в тяжелых условиях на примере электропривода механизма подъема затвора плотины гидроэлектростанции, проанализированы режимы нагрузки преобразователей частоты, предложен математический аппарат для контроля тепловых режимов асинхронного двигателя во время трогания, пуска и работы технологического механизма.

**Ключевые слова:** параметры источника питания, алгоритм трогания, нагрев.

### КЕРУВАННЯ РУШАННЯМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВАНТАЖОПДІЙМАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ

**О. А. Хребтова, В. В. Ченчевой, А. І. Гладир**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: 34092@ukr.net

Для підвищення у 2–5 рази кратності пускового моменту асинхронного двигуна запропоновано спосіб визначення необхідних значень напруги й частоти джерела живлення на базі частотно-регульованого асинхронного електропривода з урахуванням нелінійності кривої намагнічування. Застосування регресійної моделі, що відображає поліноміальну залежність пускового моменту й струму від амплітуди та частоти живлячої напруги, дозволяє розрахувати значення напруги й частоти джерела живлення для отримання заданого або максимально допустимого пускового моменту з мінімальним пусковим струмом. На базі запропонованої структури автоматизованої системи управління частотно-регульованим електроприводом розроблено алгоритм рушення асинхронного електропривода технологічного об'єкта у важких умовах на прикладі електроприводу механізму підймання затвора греблі гідроелектростанції, проаналізовано режими навантаження перетворювача частоти, запропоновано математичний апарат для контролю теплових режимів асинхронного двигуна під час рушення, пуску й роботи технологічного механізму.

**Ключові слова:** параметри джерела живлення, алгоритм рушення, нагрів.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Анализ работы электротехнического оборудования на промышленных предприятиях подтверждает негативное влияние прямых пусков нерегулируемых электроприводов на работоспособность электромеханического оборудования и качество выполнения технологических операций. При прямом пуске электрической машины вся электромеханическая система подвергается воздействию значительных моментов и усилий, которые могут превышать допустимые значения [1].

Тяжелый пуск технологического механизма является серьезной производственной проблемой во многих отраслях промышленности. Сложившаяся в Украине экономическая ситуация не позволяет большинству предприятий своевременно полностью заменять устаревшее технологическое оборудование на современные автоматизированные системы электропривода (ЭП), поэтому модернизация выполняется, как правило, частичная, т.е. на существующее оборудование устанавливаются элементы контроля и управления для полного или частичного автома-

тического управления электроприводом. Одним из примеров частичной модернизации является использование систем управляемого пуска для нерегулируемых электроприводов при трогании в тяжелых условиях [2].

Улучшение пусковых характеристик электропривода в тяжелых условиях трогания за счет усовершенствования средств и способов трогания является актуальной задачей для асинхронных электроприводов технологического оборудования горнорудного, нефтеперерабатывающего производства [1], подъемно-транспортных механизмов, выполняющих подъем габаритных грузов, таких как перегружатели на железотранспортных объектах, подъемники на паромов, в речпортах и т.д. [3]. Обозначенная задача характерна для вспомогательных технологических механизмов гидроэлектростанций (ГЭС), таких как механизм подъема затвора сливной плотины. Выполнение плановых или аварийных технологических работ при подъеме или опускании затвора сливной плотины связано с преодолением

значительных моментов сопротивления в процессе трогания.

При трогании и перемещении затвора по направляющим кармана сливной плотины момент сопротивления технологического механизма зависит от непрерывно изменяющихся физико-химических свойств уплотнительной резины в течение времени эксплуатации (7–10 лет), деформации элементов конструкции затвора в процессе эксплуатации, засорения направляющих, изменения свойств каната при выполнении технологических операций [5], нелинейного характера трения в системе, вызванного различием коэффициента трения покоя и началом проскальзывания [4], самим проскальзыванием колес затвора.

Как показано в [4], при определении момента сопротивления необходимо учитывать все свойства электромеханической системы электропривода и рабочего органа с нагрузкой, оказывающей существенное влияние на характер динамических процессов. Перечисленные факторы определяют стохастический характер момента сопротивления, который может превышать номинальное значение в 2–3 раза [5].

Электропривод механизма подъема рассматриваемого технологического объекта должен отвечать следующим требованиям: формированию достаточного пускового момента при трогании механизма; обеспечению синфазного перемещения элементов металлоконструкции затвора по направляющим кармана; контролю тепловых нагрузок в режиме трогания и пуска; формированию режимов пуска и перемещения при подъеме; осуществлении позиционирования при установке затвора в карман в соответствии с алгоритмами выполнения технологических операций.

Решение этих задач при использовании существующей системы двухдвигательного электропривода в системе «дистанционный электрический вал» трудоемко и энергозатратно, т.к. пуск, регулирование скорости и торможение осуществляют реостатной системой управления. На этапе трогания и пуска неравномерное распределение моментов сопротивлений может вызывать заклинивание движущихся элементов конструкции, возникновение несинхронного перемещения элементов конструкции и в конечном итоге аварийные ситуации, обусловленные несогласованным перемещением звеньев исполнительного органа [6].

Основным условием работы системы «дистанционный электрический вал» является идентичность параметров пары основных электрических машин и пары вспомогательных электрических машин. При отличии параметров хотя бы одной из пар машин наблюдается увеличение токов роторных цепей и, как следствие, увеличение угла рассогласования при неравномерном распределении нагрузки. Такие условия могут привести к «разрушению» электрического вала, снижению надежности и повышению сложности в обслуживании. Кроме того, процесс

трогания и пуска электропривода механизма подъема при возникновении режимов стопорения сопровождается значительными тепловыми и вибрационными нагрузками.

Перечисленные выше факторы являются основанием для поиска технических решений, обеспечивающих требуемое качество технологического процесса при минимальном потреблении электроэнергии и снижении эксплуатационных затрат за счет применения современных средств автоматизации.

Целью данного исследования является разработка алгоритмов трогания и пуска для электропривода механизма подъема затвора сливной плотины.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В работах [1, 5] обосновано применение систем управляемого трогания асинхронного двигателя с преобразователем частоты (ПЧ), обеспечивающих при минимальных затратах энергии достижение наиболее благоприятных пусковых условий и, как следствие, снижение аварийности технологического оборудования.

Организация процесса трогания при применении предложенных законов частотного управления позволяет не только повышать величину пускового момента АД, но и обеспечивать требуемую интенсивность его увеличения за счет изменения соотношения амплитуды и частоты питающего напряжения. Пусковой момент  $M_{пуск}$  повышается на заданное приращение  $\Delta M_{пуск}$ , и интенсивность возрастания усилия формируется по закону, который снижает возможное количество попыток трогания [1].

Для классических законов частотного управления характерны следующие допущения: напряжение симметричное и синусоидальное; индуктивность контура намагничивания двигателя линейная; эффект вытеснения тока отсутствует; активное сопротивление контура намагничивания принимается равным нулю [7].

При этом используемые законы не учитывают изменение электромагнитных параметров асинхронной машины ( $I_\mu$ ,  $X_\mu$ ) при снижении частоты питающего напряжения и, как следствие, при работе на пониженной частоте малоэффективны и влекут за собой повышение потерь, перегрев и износ оборудования.

В связи с этим для формирования достаточного момента трогания предложено определять амплитуду и частоту питающего напряжения частотно-регулируемого асинхронного электропривода для создания такого значения момента при неподвижном роторе, которое обеспечивает начальный процесс движения в условиях экстремальных моментов технологического механизма, вызванных процессами взаимодействия подвижных частей затвора при длительной его стоянке [8].

Влияние параметров питающего напряжения на пусковые характеристики АД исследовано путем использования рототабельного централизованного

композиционного планирования (РЦКП) эксперимента, в основе которого лежит регрессионный анализ, включающий метод наименьших квадратов и статистическую обработку данных [9]. Факторами воздействия приняты частота  $f_c$  и амплитуда питающего напряжения  $U_c$ , откликами – пусковые моменты  $M_{\text{пуск}}$  и ток статора  $I_1$ .

Так как интерес представляет режим трогания, соответствующий  $\omega_\delta = 0$ , где  $\omega_\delta$  – угловая скорость двигателя, то в зависимости от частоты питающего напряжения возможны режимы, при которых частота может быть в пределах от нуля до некоторой величины  $f_c$ , при которой  $M_{\text{пуск}}$  равен требуемому значению для обеспечения трогания.

В [10] показано, что пусковой момент, превышающий номинальный в несколько раз, можно получить в области низких частот при значительном напряжении. Следовательно, диапазон изучения параметров должен варьироваться в области средних и номинальных значений питающего напряжения (50–110 В) со средними и низкими частотами (1–25 Гц).

Известно, что при обеспечении постоянства перегрузочной способности асинхронного двигателя при частотном управлении магнитный поток машины значительно увеличивается в области низких частот 1–15 Гц, что приводит к насыщению стали магнитопровода асинхронной машины [11]. Режим насыщения сопровождается значительным уменьшением реактивного сопротивления цепи намагничивания  $X_\mu$ , увеличением тока статора  $I_1$ , что может привести к увеличению температуры обмоток статора и, как следствие, к перегреву изоляции вплоть до нарушения её целостности. При пуске такой режим нежелателен, поэтому параметры  $f_c$  и  $U_c$  необходимо определять на переходе в область насыщения магнитопровода машины при максимально возможном  $M_{\text{пуск}}$  с минимальным значением тока  $I_1$ .

В работе [12] обоснована необходимость учета влияния насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора для обеспечения точности определения параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов с тяжелыми условиями трогания. Для этого необходимо на основании экспериментальных или расчетных данных определять кривую намагничивания АД.

При аппроксимации кривой намагничивания по экспериментальным данным предложено использовать математическое выражение функции, представляющей собой универсальную зависимость, которую можно применить для описания кривой намагничивания асинхронных двигателей всего диапазона мощностей и имеющую следующий вид [13]:

$$L_\mu^*(I_\mu^*) = \frac{ab}{1 + (bI_\mu^*)^2} = \frac{d\Psi^*(I_\mu^*)}{dI_\mu^*}. \quad (1)$$

Для асинхронных двигателей серии 4А  $a = 0,9932814$ ,  $b = 1,4963076$  – коэффициенты аппроксимации.

В выражении (1)  $I_\mu^*$  – относительное значение тока намагничивания;  $\Psi^*(I_\mu^*)$  – зависимость потокосцепления от тока намагничивания.

Для более точного описания физических процессов, проходящих в асинхронной машине, использована математическая модель АД в трехфазной системе координат с учетом эффекта насыщения магнитной цепи, эффекта вытеснения тока в роторе и потерь в стали.

Расчет выполнен для электродвигателя серии АИР со следующими параметрами: номинальная мощность  $P = 45$  кВт; номинальная скорость –  $n_{\text{ном}} = 695$  об/мин; номинальный момент –  $M_{\text{ном}} = 1371$  Н·м; номинальный ток статора –  $I_{1\text{ном}} = 104$  А;  $\eta_{\text{ном}} = 0,83$ ; коэффициент мощности –  $\cos\varphi = 0,79$ ; активное сопротивление статора –  $R_1 = 0,103$  Ом; реактивное сопротивление статора –  $X_1 = 0,172$  Ом; приведенное активное сопротивление ротора –  $R'_2 = 0,091$  Ом; приведенное реактивное сопротивление ротора –  $X'_2 = 0,356$  Ом; ток контура намагничивания –  $I_\mu = 53,1$  А; коэффициент перегрузки по току –  $\lambda = 3,5$ ; перегрузочная способность по моменту –  $k = 2,8$ .

С использованием метода математического моделирования эксперимента получена модель, определяющая выражения, отображающие зависимости пускового тока  $I_1 = F(U_c, f_c)$  и пускового момента  $M_{\text{пуск}} = F(U_c, f_c)$  при трогании от параметров питающего напряжения. Гипотезу об адекватности модели проверили по F-критерию [9]. Значимость коэффициентов регрессии оценили двумя равноценными способами: построением доверительного интервала и по t-критерию Стьюдента.

Алгоритм позволяет рассчитать диапазон варьирования  $f_c$  и  $U_c$  для определенного значения  $M_{\text{пуск}}(U_c, f_c)$ , которое задается как  $M_{\text{пуск}} = k'M_k$ , где  $k'$  – коэффициент увеличения пускового момента асинхронной машины (2–5);  $M_k$  – паспортное значение критического момента асинхронной машины при  $I_1 \leq I_{\text{пуск.макс}}$ .

Применение регрессионной модели, отображающей полиномиальную зависимость пускового момента и тока от амплитуды и частоты напряжения питания, позволяет получить необходимое значение пускового момента при минимальном пусковом токе с учетом изменения электромагнитных свойств

асинхронной машины, в том числе изменения индуктивности намагничивания в результате насыщения электромагнитной цепи. Таким образом, учитывая изменение электромагнитных свойств машины при понижении частоты источника питания, появляется возможность расчета таких параметров напряжения питания, которые действительно обеспечат формирования пускового момента, превышающего момент критический в 2–5 раз [8].

При рассмотрении процесса трогания системы «электродвигатель–технологический механизм» с позиции сил, формирующихся в системе, можно выделить два этапа.

Первый этап – неподвижный технологический механизм характеризуется силами трения покоя между взаимно неподвижными элементами электро-механической системы, а именно: рабочей среды, рабочего органа и кинематической цепью электропривода, которые формируют момент сопротивления, прикладываемый в точке соединения неподвижного рабочего элемента и вала электропривода. При недостаточном движущем моменте вал двигателя, а, следовательно, и ротор асинхронной машины находятся в неподвижном состоянии. Пусковой ток соответствует току короткого замыкания и является источником нагрева обмоток асинхронной машины. Температура нагрева зависит от амплитудного значения тока и времени его действия  $\Theta = F(I_1, t)$ .

Второй этап – переход из неподвижного состояния рабочего органа в состояние движения и выход на заданный режим работы системы.

При трогании на первом этапе необходимо ограничивать пусковой ток или по амплитуде, или по времени прохождения тока по обмоткам асинхронного двигателя. Ограничение амплитуды тока приводит к снижению пускового момента, т.к. электромагнитный момент прямо пропорционален квадрату

пускового тока  $M_{\text{пуск}} = \frac{3R_2'}{\omega_0} \left( I_1 \frac{Z_o}{Z_2' + Z_o} \right)^2$ , где

$R_2'$  – приведенное активное сопротивление ротора;  $\omega_0$  – угловая скорость холостого хода;  $I_1$  – ток статора;  $Z_o$  – полное сопротивление цепи намагничивания;  $Z_2'$  – приведенное полное сопротивление цепи ротора [11].

Следовательно, процессы трогания и пуска выполняются при кратковременном создании значительных пусковых моментов и имеют импульсный характер [1]. Применяя предложенный выше способ определения напряжения и частоты для получения требуемого момента трогания, максимально допустимый пусковой момент формируется при условии соблюдения допустимой перегрузки по току. В некоторых случаях для выполнения трогания технологических механизмов формирование момента с допустимой перегрузкой по току недостаточно. Учитывая кратковременный характер пусковых момен-

тов, можно формировать задание  $f_c$  и  $U_c$  источника питания, при котором токовая перегрузка асинхронного двигателя АД больше допустимой  $I_1 > I_{\text{пуск.макс}}$ .

Процесс трогания и пуска сопровождается наличием пусковых токов, превышающих номинальные в 3–10 раз, асинхронная машина подвергается тепловым нагрузкам при значительном моменте сопротивления на валу двигателя, и естественно, что за короткое время выделяется большое количество тепловой энергии [14]. Для предотвращения перегрева обмоток двигателя при формировании пусковых моментов процесса трогания необходимо контролировать время работы АД.

При трогании, когда ротор находится в неподвижном состоянии и движение воздуха заключенного внутри закрытого двигателя отсутствует, имеет место адиабатный процесс, т.е. теплоотдача практически отсутствует:  $\lambda \approx 0$  [15]. Тепло, выделяющееся в проводниках обмотки статора, при отсутствии движения потоков воздуха и кратковременности теплового процесса не успевает передаваться в окружающую среду и практически полностью идет на нагрев. Время импульса пускового момента намного меньше тепловой постоянной времени нагрева асинхронного двигателя:  $t_{\text{имп}} \ll T$ .

При расчете температуры нагрева обмоток статора примем следующие допущения: – фазные обмотки симметричны и сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ ; – магнитодвижущая сила обмоток и магнитных полей распределена синусоидально вдоль воздушного зазора; – ротор электрически и магнитно симметричен.

Применение различных методов построения эквивалентных тепловых схем (ЭТС) для расчета температурных режимов АД – сложная задача, требующая значительных ресурсозатрат [16]. По мнению авторов, в данном случае и с учетом вышеизложенных предположений, применение ЭТС нерентабельно, т.к. тепловые схемы описывают физические процессы, происходящие в асинхронной машине при  $\omega_\delta \neq 0$  и при  $\omega_\delta = 0$ . Поэтому при расчете частного случая, когда ротор машины неподвижен, большая часть переменных в уравнениях ЭТС равна нулю и сложность расчета не соответствует поставленной задаче. При описанном выше режиме работы АД в большей степени, по сравнению с другими частями асинхронной машины, будут нагреваться обмотки статора, т.к. ток, протекающий в обмотках статора, равен:

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_\mu^2}, \quad (2)$$

где  $I_2$  – ток ротора;  $I_\mu$  – ток контура намагничивания.

Поэтому, учитывая принятые допущения, температуру нагрева АД рационально контролировать по нагреву обмотки статора одной из фаз.

Величина активного сопротивления находится

по известной зависимости [17]

$$R = R_n(1 + \alpha\Theta(t)), \quad (3)$$

где  $R_0$  – сопротивление обмотки статора в холодном состоянии, Ом;  $\alpha$  – температурный коэффициент,  $1/^\circ\text{C}$ . Уравнение энергетического баланса проводника фазы обмотки статора с учетом (3) выражается следующей математической зависимостью:

$$\Delta P_1(1 + \alpha\Theta(t)) = Cm \frac{d\Theta_{np}}{dt}; \quad (4)$$

$$\Delta P_1 = I_1^2 R_1 + \Delta P_{cm},$$

где  $\Delta P_1$  – общие потери в обмотках статора при изменении частоты питания, Вт;  $\Delta P_{cm}$  – потери в стали, Вт;  $I_1$  – ток статора, А;  $R_1$  – активное сопротивление статорной цепи, Ом;  $t$  – время действия тока, с;  $C$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $m = \rho S l n$  – масса проводника, кг;  $\rho$  – плотность материала обмотки, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь сечения проводника, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина проводника обмотки фазы статора, м;  $n$  – количество проводников;  $\Theta_{np}$  – температура нагрева,  $^\circ\text{C}$ .

Известно, что изменение частоты питающего напряжения влияет на изменение параметров электромагнитной цепи асинхронной машины [12], поэтому потери в стали учитываются по методике, предложенной в [18], где в режиме насыщения потери определяются следующим образом:

$$\Delta P_{cm} = \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_\mu)}{dI_\mu}\right)^2} (E(I_\mu))^2, \quad (5)$$

где  $\xi$  – конструктивный коэффициент, зависящий от параметров ферромагнитного материала (0,003–0,004);  $I_\mu$  – ток магнитной цепи асинхронной машины, А;  $E(I_\mu)$  – зависимость кривой намагничивания от тока намагничивания [18].

Контроль температурного режима выполняется не только в процессе трогания и пуска, когда асинхронная машина находится в области насыщения магнитопровода, но и при выполнении технологических работ при использовании закона частотного управления  $U/f = const$ . В таких случаях учет потерь стали в двигателе в ненасыщенном состоянии магнитной системы рассчитывается по (5), где конструктивный коэффициент  $\xi$  меняется на  $\xi' = 0,002$ .

Зависимость изменения температуры обмотки при заторможенном роторе во времени, с учетом изменения сопротивления при нагреве и  $I_1 = const$ , а также при нулевых начальных условиях рассчитывается по выражению

$$\Theta(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left(\Theta_0 + \frac{1}{\alpha}\right) e^{\frac{\Delta P_1 \alpha}{Cm} t}. \quad (6)$$

В соответствии с начальными условиями зависимость (6) верна при выполнении первой попытки трогания, температура обмоток статора двигателя соответствовала температуре окружающей среды, т.к. электрическая машина была не под напряжением и без движения.

Когда к асинхронному двигателю прикладывают напряжение с расчетными параметрами для осуществления попыток трогания повторно через короткий период времени, характеризующий паузу, начальные условия для (4) определяются значением нагрева от предыдущего токового импульса  $\Theta_{i-1}$ , где  $i$  – номер импульса момента, который формируется для АД при трогании.

Выражение (6), с учетом заданных начальных условий, принимает следующий вид:

$$\Theta_i(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left(\Theta_{i-1} + \frac{1}{\alpha}\right) e^{\frac{\Delta P_1 \alpha}{Cm} (t - t_{i-1})}. \quad (7)$$

По (7), учитывая параметры машины, рассчитываем допустимое значение температурного предела с учетом параметров окружающей среды. Допустимый нагрев электродвигателя определяется наименее теплостойкими материалами его конструкции. Таким материалом является изоляция его обмотки.

В нашем случае предельная температура перегрева обмотки класса С не превышает  $180^\circ\text{C}$  [19] и ограничивается свойствами примененных материалов. При одной и той же нагрузке электродвигателя нагрев его будет неодинаковым при разных температурах окружающей среды. Расчетная температура  $\Theta_0$  окружающей среды равна  $20^\circ\text{C}$  [19]. Из выражения (7) определяем допустимое время работы двигателя при заданном  $\Theta_{don}$ :

$$t_i = \frac{Cm}{\Delta P_1 \alpha} \ln \left( e^{\frac{\Delta P_1 \alpha}{Cm} t_{i-1}} \right). \quad (8)$$

Данное выражение позволяет определить время, при котором двигатель работает с токами, значение которых  $I_1 \geq I_{н\text{уск.макс}}$ , но средний нагрев обмоток за импульс не превышает  $\Theta_{don}$ .

Применение преобразователя частоты в данных условиях обусловлено не только возможностью повышения управляемости технологического процесса, но и способностью силовых преобразователей частоты работать с кратковременной перегрузкой по току [20]. В табл. 1 приведены предельно допустимые режимы нагрузки, которые должны обеспечиваться ПЧ при номинальном питающем напряжении.

Например, режим 11 соответствует возможности силового преобразователя частоты выдерживать нагрузку  $2,25 I_{ном}$  в течение 10 с с паузой 12,5 с и максимальное время цикла 10 мин, при этом среднеквадратичное значение тока в течение цикла  $I_{ном}$ .

Для реализации трогания рассматриваемого механизма, в соответствии с разработанным алгорит-

мом [8], предложена автоматизированная система управления электроприводом (СУЭП) механизма подъема затвора плотины ГЭС на базе частотно-регулируемого электропривода, которая оснащена следующими устройствами (рис. 1). На основании затвора установлены два контролирующих устройства – ультразвуковые датчики положения ДП1 и ДП2. Данный тип датчиков работает в зоне с повышенной запыленностью воздушной среды, температура эксплуатации (-25 °С)–(+ 70 °С) с диапазоном измерения до 20000 мм. Координаты размещения датчиков строго соотносены с пространственными координатами положения сторон затвора в кармане.

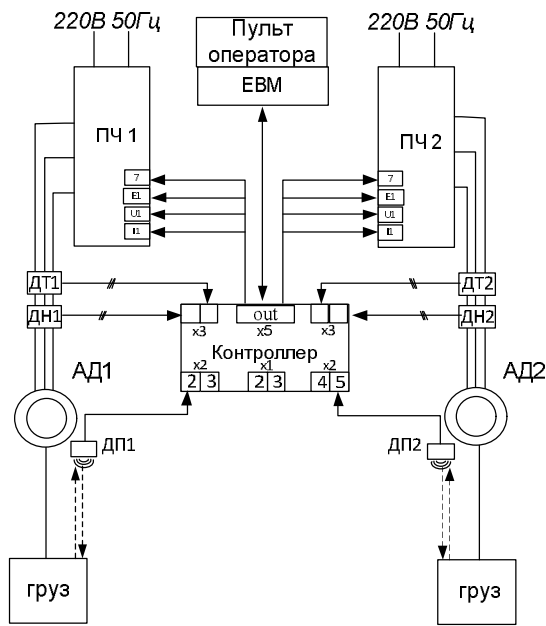


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления электропривода

Датчик положения должен обладать достаточной чувствительностью (разрешающей способностью) для измерения перемещений с точностью до ±5 мм при расстоянии срабатывания до 20 м. Расстояние срабатывания обусловлено типоразмерами затвора и расположением его в кармане сливной плотины [21].

Диапазон измерений позволяет использовать датчики как при реализации режима трогания и пуска, так и при реализации режима перемещения затвора при подъеме и установке в карман плотины.

Контроль режимов работы электропривода выполняется на основании эффективных значений тока и напряжения при использовании датчиков тока ДТ и напряжения ДН. Данные с измерительных устройств (ДТ, ДН и ДП) поступают на контроллер, где по заданному алгоритму рассчитываются значения для формирования сигналов задания и определения времени их подачи на преобразователи частоты (ПЧ1 и ПЧ2) каждого асинхронного двигателя (АД1, АД2) с целью получения пускового момента с расчетными значениями частоты  $f_c$  и напряжения  $U_c$ . Расчетное значение тока  $I_1$  при известных параметрах напряжения питания АД сравнивается с показаниями датчика тока. Алгоритм выполнения трогания и пуска приведен на рис. 2.

Процесс подъема плотины состоит из двух этапов: первый – трогание затвора и второй – подъем затвора с кармана плотины.

Работа технологического механизма начинается с поступления сигнала «Пуск» на контроллер. Последний формирует сигнал задания на ПЧ1 и ПЧ2 с законом частотного управления  $U/f = const$  при синфазной работе АД1 и АД2 на пониженной скорости,  $\omega = 0,1\omega_{ном}$  для плавной выборки зазоров в кинематических парах и канатах [22]. Этап выборки зазоров в канатах контролируется по значению  $I_1 \leq I_{ном}(U_c, f_c)$ , где  $U_c$  и  $f_c$  – значения напряжения с частотой для обеспечения  $0,1\omega_{ном}$ .

Таблица 1 – Режимы нагрузки преобразователей частоты до 80 кВА

п/п	Нагрузка % от $I_{ном}$	Длительность нагрузки, с	Среднеквадратичное значение тока в течение цикла, % от $I_{ном}$	Время цикла, мин	
1	125	900	100	30	
2		300	110	10	
3				30	
4	150	120	100	10	
5		60		30	
6				10	
7	175	60	100	30	
8		15		10	
9					10
10					5
11		10			10

Если указанное условие выполняется, производится остановка обоих электроприводов через время  $t_{n1}$ , которое состоит из времени срабатывания устройств коммутации  $t_{вкл.}$ , времени окончания переходного процесса при отключении питания двигателя  $t_{н.н.}$ , машинного времени контроллера для обработки входных сигналов и выполнения расчета  $t_{с.к.}$ .

Контроллер по разработанному алгоритму выдает сигнал задания на ПЧ1, который формирует значения напряжения  $U_{ci}$  с заданной частотой  $f_{ci}$  источника питания для создания на АД1 пускового момента  $M_{ад1} = M_{пуск}$  (соответствующего паспортным данным), где  $i$  – номер попытки трогания электропривода. По окончании времени  $t_m$  двигатель останавливается и по данным ДПП определяется положение затвора.

Показатель  $t_m$  характеризует время срабатывания устройств автоматизированной системы частотно-регулируемого электропривода:

$$t_m = t_{вкл.} + t_{ПЧ} + t_{ДП} + T_{эм}, \quad (10)$$

где  $t_{вкл.}$  – время срабатывания устройств коммутации при включении двигателя;  $t_{ПЧ}$  – время срабатывания преобразователя частоты;  $t_{ДП}$  – время срабатывания датчика положения;  $T_{эм}$  – время создания тяговых усилий электроприводом при заданных параметрах питающего напряжения.

В случае, если движение затвора отсутствует, контроллер по заданному алгоритму рассчитывает значение напряжения  $U_{ci}$  с частотой  $f_{ci}$  для создания на АД1 пускового момента  $M_{пуск} = k'M_k$  с учетом паспортного значения коэффициента перегрузки ( $k$ ) асинхронной машины.

При отсутствии движения затвора на следующем этапе выполнения трогания по заданию контроллера ПЧ1 и ПЧ2 формируют напряжение с заданной частотой для создания максимально возможного пускового момента  $M_{пуск.макс}$  при условии, что ток статора минимальный  $I_1 \rightarrow \min$  и не превышает значение пускового тока  $I_1 \leq I_{пуск.макс}$ . Если после этой попытки движение технологического механизма не зафиксировано, то необходимо выполнить следующие шаги. Время подачи импульса принимаем минимально возможное и равно  $t_m$  (табл. 2). Зная пределы нагрева  $\Theta_{дон}$  из (7), где  $\Theta_{дон} = F(I_1, t)$ , определяем допустимый ток при формировании пускового момента:

$$I_{1.дон} = \sqrt{\frac{\frac{Cm}{t_i \alpha} \ln \left( e^{\frac{\Delta P_{i-1} \alpha}{Cm} t_{i-1}} \right) - \Delta P_{cmi}}{R_1}}. \quad (11)$$

По расчетному значению  $I_{1.дон}$  из зависимости  $I_1(U_c, f_c)$  определяем значение напряжения  $U_c$  с частотой  $f_c$  для получения максимально возможного момента при  $I_1 = I_{1.дон}$  с контролем допустимого нагрева обмоток статора асинхронного двигателя. Если расстояние от контрольной точки с двух датчиков положения уменьшилось  $l_{ki} < l_{ном}$  и  $l_{2,ki} < l_{ном}$ , где  $l_{ki}$ ,  $l_{2,ki}$  – текущее (контрольное) значение перемещения груза за  $i$ -ю попытку первого и второго электроприводов технологического механизма соответственно,  $l_{ном}$  – номинальное значение перемещения груза, то технологический механизм пришел в движение и алгоритм переходит на выполнение режима подъема затвора по направляющим кармана.

Если условие не выполняется для обоих электроприводов, то пошаговое повышение пусковых моментов в соответствии с алгоритмом выполняется поочередно для каждого электропривода. Если один из ЭП приходит в движение, то формирование пусковых моментов в соответствии с алгоритмом выполняется только для неподвижного электропривода.

При отсутствии движения объекта после всех попыток алгоритм предполагает наличие повреждений в электромеханической системе и выдает сигнал «Авария».

Циклограмма формирования моментов на асинхронных приводах технологического механизма при выполнении трогания и пуска представлена на рис. 3. В процессе выполнения всего алгоритма контролируются параметры нагрева АД как мгновенные, так и средние по значению за импульс и за цикл.

Условие для среднего значения за импульс  $\Theta_{ср.}(t) \leq \Theta_{дон}(t)$ , где  $\Theta_{дон}$  – допустимое значение превышения температуры. Превышение температуры в течение цикла выше допустимой приводит к остановке алгоритма и оповещению об аварии.

Таким образом, при выполнении алгоритма трогания реализуется контроль температурного режима в диапазоне  $(1-5)M_k$  за счет фиксации мгновенных эффективных значений тока  $i(t)$  и определением  $\Theta_i$ ,  $\Theta_{\Sigma}$  с помощью предложенного математического аппарата в соответствии с уравнением теплового баланса.

Результаты расчета температуры нагрева обмоток ротора при выполнении трогания приведены в табл. 2.

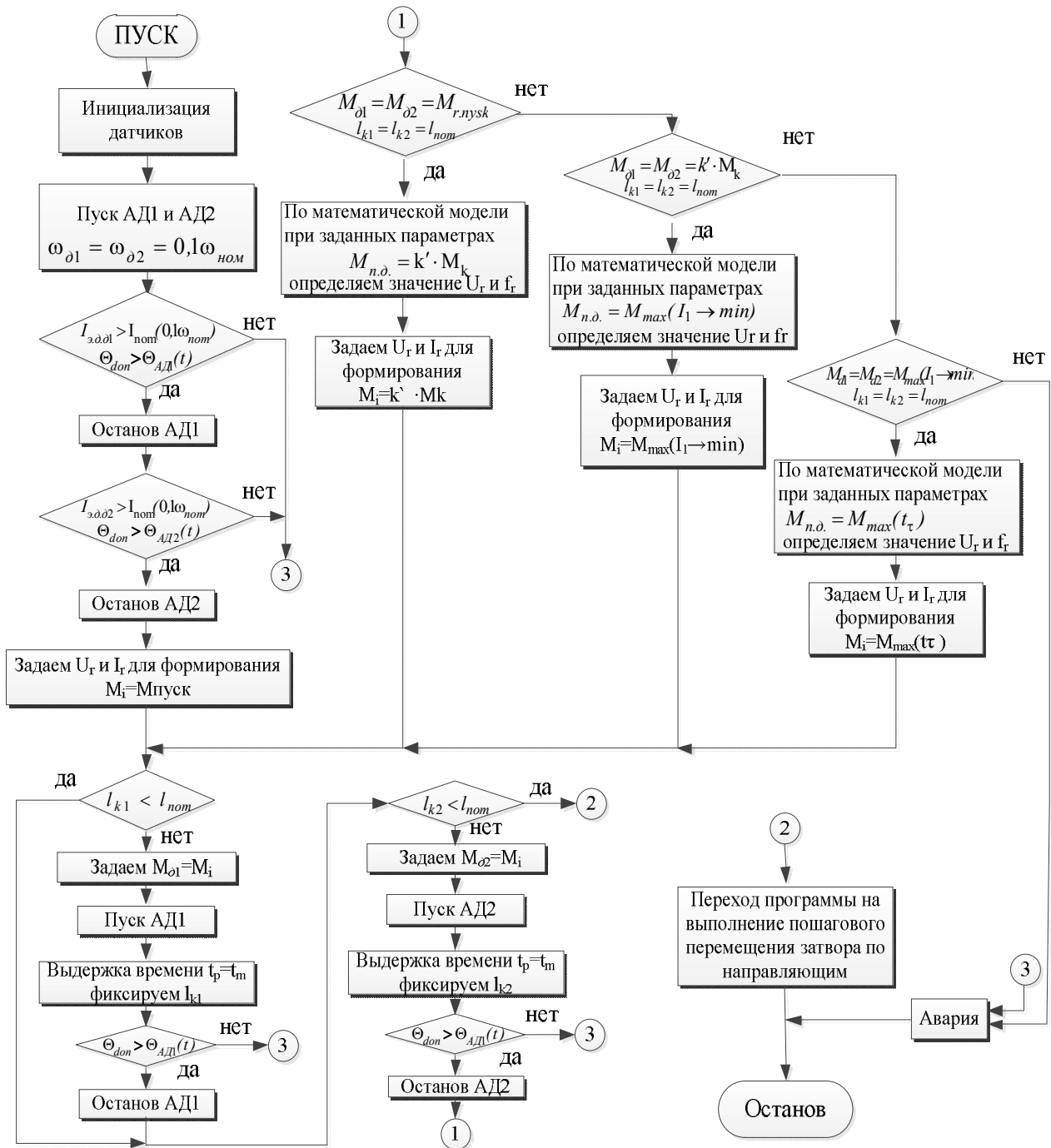


Рисунок 2 – Алгоритм выполнения трогания и пуска

Из табл. 2 видно, что при проведении трогания по предложенному алгоритму для рассматриваемого ЭП при пошаговом увеличении моментов, которые прикладываются поочередно к приводам механизма подъема, нагрев статорных обмоток асинхронных машин не превышает  $0,7\Theta_{дон}$ .

Следовательно, при необходимости дальнейшего увеличения пускового момента по (11) определяем допустимый ток ( $I_{1,дон} = 2,5I_{д.пуск}$ ), из [8] определяем напряжение  $U_c = 1,195U_{ном}$  с частотой  $f_c = 0,38f_{ном}$  питающей сети, при этом асинхронная

машина находится в области перехода в насыщение и формирует пусковой момент, равный  $M_{пуск.макс} = 5,5M_k$ .

Переход алгоритма на выполнение подпрограммы подъем затвора из кармана плотины осуществляется по выполнению условий  $I_k < I_{ном}$  и  $I2_k < I_{ном}$ .

Алгоритм программы подъем затвора из кармана плотины с применением пошагового перемещения затвора по направляющим кармана в случае заклинивания или стопорения приведён на рис. 4.



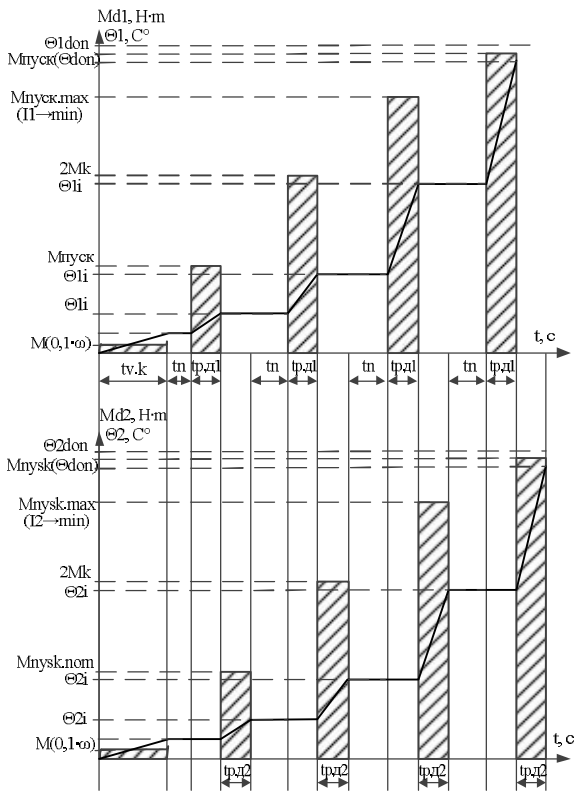


Рисунок 3 – Циклограма формування моментів при троганні асинхронних приводів технологічного механізму

При выполнении подъема затвора после трогания электроприводы подъемного механизма работают синфазно, создавая усилия для перемещения затвора по направляющим кармана без перекосов и заклинивания. Равномерное и синхронное перемещение затвора может сопровождаться неравномерным распределением нагрузки и, соответственно, разными значениями движущих моментов на электроприводах.

Учитывая стохастический характер, момент сопротивления косвенно контролируется по мгновенным эффективным значениям тока  $i(t)$ . Если  $i(t) > I_{1.ном}$ , то алгоритм выполняет перемещение в «шаговом» режиме (рис. 4). На ЭП механизма подъема подаются поочередно управляющие импульсы для создания тяговых усилий, необходимых и достаточных для перемещения затвора на заданное расстояние. Расстояние перемещения рассчитывается по параметрам металлоконструкции затвора таким образом, чтобы предотвратить заклинивания и стопорения затвора в кармане при подъеме.

При необходимости преодоления увеличенного момента сопротивления в процессе подъема используется алгоритм формирования повышенного момента двигателя.

Таблица 2 – Значения параметров источника питания при выполнении алгоритма трогания с контролем температуры

№ импульса	Время импульса $t, c$	Частота питающего напряжения $f^*=f/fc$ ; $fc=50$ Гц	Действующее значение напряжения $U^*=U/Uc$ ; $Uc=220$ В	Момент двигателя $M^*d=Md/Md.нукс$ ; $Md.нукс=1371$ , Нм	Пусковой ток двигателя $I^*d=Id/Id.нукс$ ; $Id.нукс=395$ , А	Температура нагрева $\Theta^*d=\Theta d/\Theta don$ ; $\Theta don=180$ , °C
1	$t_{v.k} = 62,365$	0,1	0,1	0,285	0,189	0,035
Пауза $t_i = 0,686$ с						
2	$t_{p01}=t_{p02}=0,226$	0,01	0,037	0,546	0,116	0,069
Пауза $t_i = 0,686$ с						
3	$t_{p01}=t_{p02}=0,226$	0,02	0,087	1	0,164	0,14
Пауза $t_i = 0,686$ с						
4	$t_{p01}=t_{p02}=0,226$	0,08	0,305	3	1	0,3
Пауза $t_i = 0,686$ с						
5	$t_{p01}=t_{p02}=0,226$	0,36	1	4,2	2,15	0,7

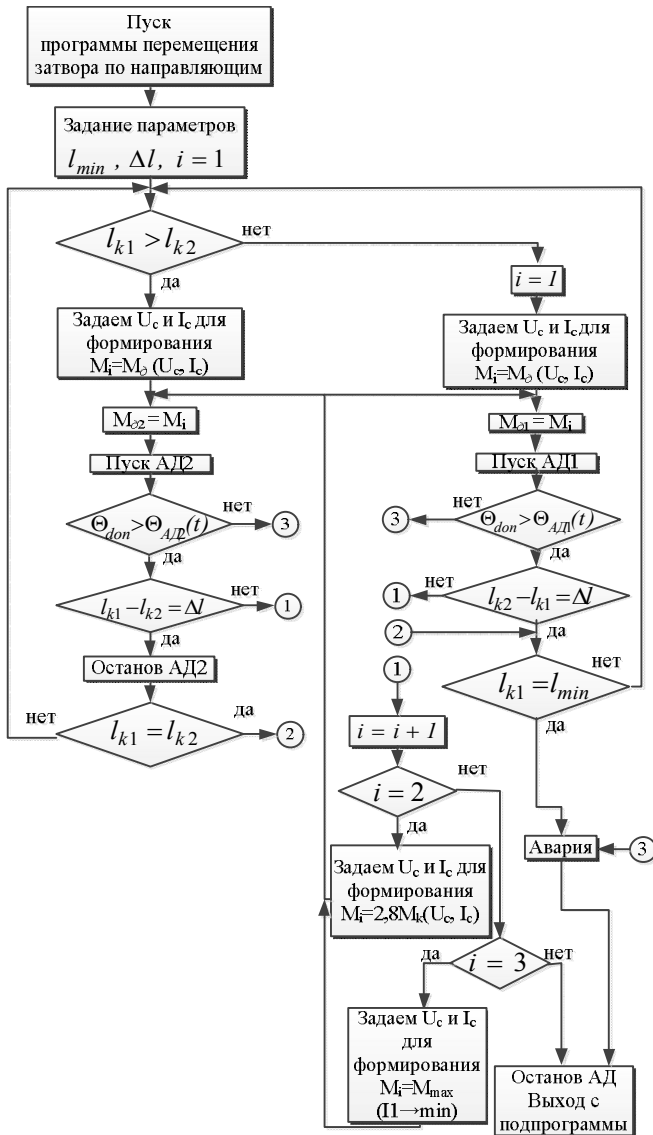


Рисунок 4 – Алгоритм пошагового перемещения затвора по направляющим кармана

**ВЫВОДЫ.** Анализ исследований процесса пуска электропривода механизма подъема затвора плотины гидроэлектростанции подтвердил необходимость улучшения пусковых характеристик электропривода в тяжелых условиях трогания и пуска.

На основе математической модели асинхронного привода, с учетом электромагнитных свойств и требований, определенных к электроприводу механизма подъема, разработаны алгоритмы, позволяющие выполнить управление троганием технологического механизма с определением параметров напряжения с частотой питающего напряжения при управлении на пониженной частоте ( $0,037 - 0,38 f_{ном}$  Гц) с учетом электромагнитных свойств асинхронной машины и контролем температурных режимов работы. Это дает возможность повысить эффективность выполнения технологической операции, избежать аварийных ситуаций и значительно увеличить рабочий

ресурс оборудования, в целом повысит энергоэффективность рассмотренного объекта.

С использованием метода определения потерь в стали в режиме глубокого насыщения рассчитан цикл работы асинхронного двигателя, выведены математические зависимости расчета температурного режима при выполнении алгоритма, учитывающие изменение свойств обмотки статора при нагреве, рассчитаны допустимые параметры перегрузки по току с учетом допустимого нагрева обмоток статора.

Предложена система управления электроприводом для реализации разработанных алгоритмов трогания и пуска.

Предложенный авторами алгоритм трогания и пуска не ограничен в применении лишь для подъемно-транспортных механизмов и может применяться в качестве основы при разработке и создании систем управляемого трогания и пуска для любых других технологических механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г. и др. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
2. Мухамадеев Р.В. Преобразователи частоты и устройства плавного пуска для электроприводов переменного // Энергетика Татарстана. – 2010. Вып. 17. – С. 44–53.
3. Масандилов Л.Б. Электропривод подъемных кранов: учеб. пособие. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 100 с.
4. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. – Харьков: Изд-во «Підручник НТУ «ХП»», 2014. – 408 с.
5. Хребтова О.А., Гладырь А.И. Особенности трогания кранового электропривода подъема затвора сливной плотины // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Тематический выпуск № 30 «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – 2009. – 250 с.
6. Хребтова О.А., Гладир А.И. Модернізація електропривода механізму підймання затвора зливної греблі в умовах Кременчуцької ГЕС // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63), част. 2. – С. 56–58.
7. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1966. – 146 с.
8. Хребтова О.А., Ченчевой В.В., Огарь В.А. Определение момента асинхронного двигателя при трогании // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 4/2013 (24). – С. 61–69.

9. Адлер Ю.П., Маркова Є.В., Грановський Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 289 с.

10. Штурман Г.И. К вопросам частотного управления асинхронными двигателями // Вестник электропромышленности. – 1946. – Вып. 2. – С. 30–35.

11. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 577 с.

12. Огарь В.А., Родькин Д.И. Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейных свойств магнитной системы: монография. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2013. – 320 с.

13. Родькин Д.И., Ченчевой В.В., Огарь В.О. Об определении потерь в стали асинхронного двигателя при глубоком ее насыщении // Электромеханические и энергосберегающие системы: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вып. 2/2013 (22). – С. 75–85.

14. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.

15. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 316 с.

16. Обзор методов теплового расчета и существующих моделей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.physic-explorer.ru/obzor\\_metodov\\_teplovogo\\_rascheta\\_i\\_sushchestvuyushchih\\_modeley-441-1.html](http://www.physic-explorer.ru/obzor_metodov_teplovogo_rascheta_i_sushchestvuyushchih_modeley-441-1.html)

17. Шидловська Н.А. Нелінійні кола з тепловими втратами. – К.: Наукова думка, 2002. – 160 с.

18. Ченчевой В.В., Родькин Д.И., Огарь В.А. Природа аномального роста потерь в электротехнической стали в режиме глубокого насыщения // Электромеханические и энергосберегающие системы: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вып. 1/2014 (25). – С. 76–93.

19. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

20. Государственный стандарт Союза ССР ГОСТ 24607–88 "Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования" (утв. постановлением Госстандарта СССР от 6 декабря 1988 г. N 3955) (с изменениями от 5 февраля 1991 г.).

21. Хребтова О.А., Гладир А.И. Модернізація електропривода механізму підйому затвора зливної греблі в умовах Кременчуцької ГЕС // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вып. 4/2010 (63), част. 2. – С. 59–63.

22. Абрамович И.И., Березин В.Н., Яуре А.Г. Грузоподъемные краны промышленных предприятий. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.

## CONTROL OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WHEN STARTING IN THE HEAVY CONDITIONS

**O. Khrebtova, V. Chencheyov, A. Gladyr**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: 34092@ukr.net

To improve in 2–5 times the multiplicity of the starting torque of the induction motor is provided a method definition, dividing the required voltage and frequency of the power supply on the basis of the variable frequency Asynchronous motor drive based on the nonlinearity of the magnetization curve. It is established that the use of regression model displayed polynomial dependence of the starting torque and current on the amplitude and frequency of the supply voltage, allows the calculation of voltage and frequency of the power source for the specified or the maximum starting torque with a minimum starting current. On the basis of the proposed structure of the automated control system for variable frequency drives, the algorithm of asynchronous electric pick-processing facility in severe conditions, electric hoist gate dam analyzed modes of load frequency converters is proposed mathematical apparatus for controlling thermal modes of induction motor during Breakaway, commissioning and operation of process machinery.

**Key words:** power supply parameters, the algorithm breakaway, heating

### REFERENCES

1. Chornyi, O.P., Gladyr, A.I., Osadchuk, Y.G. and others (2006), *Puskovyye sistemy nereguliruyemykh elektroprivodov: monografiya* [Starting system uncontrollable drive: monograph], PE Scherbatykh A.V., Kremenchuk. (in Russian)

2. Mukhamadeev, R.V. (2010), "Frequency converters and soft starters for AC Power", *Energetika Tatarstana*, Vol. 17, pp. 44–53. (in Russian)

3. Masandilov, L.B. (1998), *Elektroprivod podzemnykh kranov: uchebnoye posobiye* [The electric drive of lifting cranes: a tutorial], Publishing MEI, Moscow. (in Russian)

4. Klepikov, V.B. (2014), *Dinamika elektromekhanicheskikh sistem s nelineynym treniyem: monografiya* [Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph], Izdatelstvo "Pidruchnik NTU "KhPI", Kharkov. (in Russian)

5. Khrebtova, O.A. and Gladyr, A.I. (2009), "Features breakaway crane electric lift gate drain dam", *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "Khar'kovskiy politekhnicheskyy institut"*, no. 30, 250 p.

6. Khrebtova, O.A. and Gladyr, A.I. (2010), "Modernization of electric lifting mechanism drain bolt dam in terms of Kremenchug HPP", *Visnyk KDPU*, Vol. 4, no. 63, part. 2, pp. 56–58. (in Ukrainian)

7. Sandler, A.S. and Sarbatov, R.S. (1966), *Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency control of asynchronous motors], Energia, Moscow. (in Russian)
8. Khrebtova, O.A., Chenchevoy, V.V. and Ogar, V.A. (2013), "Defining moment asynchronous motors when starting", *Elektromehanični i energozberigayuchi systemy: naukovyi schokvartalny virobnychi zhurnal*, Vol. 4, no. 24, pp. 61–69 (in Ukrainian)
9. Adler, Yu.P., Markova, E.V. and Granovsky, Yu.V. (1976), *Planuvannya eksperymentu pry poshuku optymalnykh umov* [Planning an experiment in finding optimal conditions], Nauka, Moscow. (in Russian)
10. Shturman, G.I. (1946), "The issues of frequency control asynchronous motors", *Vestnik elektropromyshlennosti*, Vol. 2, pp. 30–35. (in Russian)
11. Chilikin, M.G. and Sandler, A.S. (1981), *Obshchiy kurs elektroprivoda* [The general course of the drive], Energoizdat, Moscow. (in Russian)
12. Ogar, V.A. and Rodkin, D.I. (2013), *Kharakterystyky asinkhronnykh dvyhuniv z urakhuvannyam neliniynikh vlastivostey mahnitnoy systemy : monohrafiya* [Characteristics of induction motors based on nonlinear properties mahnitnoy system: monograph], PE Shcherbatykh A.V., Kremenchuk. (in Ukrainian)
13. Rodkin, D.I., Chenchevoy, V.V. and Ogar, V.O. (2013), "On the determination of the iron loss of the induction motor with its deep saturation", *Elektromehanični i energozberigayuchi systemy: Schokvartalny naukovy-virobnichyi zhurnal*, Vol. 2, no. 22, pp. 75–85.
14. Petrov, I.I. and Meystel, A.M. (1968), *Spetsialnyye rezhimy raboty asinkhronnogo elektroprivoda* [Special modes of asynchronous electric], Energia, Moscow. (in Russian)
15. Gurevich, E.I. and Rybin, Y.L. (1983), *Perekhodnyye protsessy v elektricheskikh mashinakh* [Transients in electrical machines] Energoatomizdat, Leningrad. (in Russian)
16. "Review of the methods of calculation and the heating the essential models" [electronic resource], available at: [http://www.physic-explorer.ru/obzor\\_metodov\\_teplovogo\\_rascheta\\_i\\_sushchestvuyuschih\\_modeley-441-1.html](http://www.physic-explorer.ru/obzor_metodov_teplovogo_rascheta_i_sushchestvuyuschih_modeley-441-1.html) (in Russian)
17. Shydlovska, N.A. (2002), *Neliniyni kola z teplovyimi vtratamy* [Non-linear range of the heat losses], Naukova dumka, Kyiv. (in Ukrainian)
18. Chenchevoy, V.V., Rodkin, D.I. and Ogar, V.A. (2014), "The nature of the abnormal growth of losses in electrical steel in deep of the saturation mode", *Elektromehanični i energozberigayuchi systemy: schokvartalny naukovy-virobnichyi zhurnal*, Vol. 1, no. 25, pp. 76–93 (in Russian)
19. Filippov, I.F. (1986), *Teploobmin v elektrichnykh mashynakh: navchalnyi posibnyk dlya vuziv* [Heat transfer in electric machines: a manual for high schools], Energoatomizdat, Leningrad. (in Russian)
20. State Standard GOST 24607–88 USSR "Frequency converters semiconductor. General technical requirements" (app. USSR State Standard Resolution of 6 December 1988, N 3955) (as amended on February 5, 1991). (in Russian)
21. Khrebtova, O.A. and Gladyr, A.I. (2010), "Modernization of electric winders gate drain the dam in terms of Kremenchug HPP", *Visnyk KDPU: naukovyi pratsi KDPU*, Vol. 4, no. 63, part. 2, pp. 59–63. (in Ukrainian)
22. Abramovich, I.I., Berezin, V.N. and Joure, A.G. (1989), *Gruzopodyemnyye krany promyshlennykh predpriyatiy* [Cranes industrial enterprises], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 18.09.2014.