

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-145-154

УДК 621.865.8-83

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СУХОГО ТРЕНИЯ ЗВЕНА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА С ЧАСТОТНЫМ ПРИВОДОМ В ЗОНЕ МАЛОЙ СКОРОСТИ

### MODELING OF DRY FRICTION LINK OF THE PRODUCTION MECHANISM WITH A FREQUENCY DRIVE IN THE LOW SPEED ZONE

**Карнаухов Николай Федорович,**

кандидат технических наук, доцент, e-mail: nika811@bk.ru

**Nikolai F. Karnaukhov,** Candidate of Technical Sciences, Associate professor

**Филимонов Максим Николаевич,**

старший преподаватель, e-mail: maxfil2006@yandex.ru

**Maxim N. Filimonov,** senior lecturer

**Смяцкий Дмитрий Андреевич,**

аспирант, e-mail: aid219@mail.ru

**Dmitry A. Smyatsky,** Post-graduate student

Донской государственный технический университет, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1  
Don State Technical University, 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

**Аннотация:** В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния сил сухого трения на характер движения производственного механизма в зоне малой скорости, приведены обоснования к применению двухрежимного управления автономного инвертора напряжения, даны рекомендации по расширению области применения частотно-управляемых электроприводов производственных механизмов. Случайный характер изменения сил трения подвижного звена в направляющих производственного механизма в процессе пуска и торможения асинхронного двигателя создают трудности в реализации программируемой остановки и снижают точность позиционирования рабочего органа производственного механизма. Наличие пульсирующих моментов на валу асинхронного двигателя при пуске и торможении, обусловленных гармониками тока статора, в совокупности с моментом трения в контактирующих зонах подвижных звеньев и направляющих производственного механизма значительно ухудшает реальную динамику движения выходного звена, повышает вероятность появления вынужденных колебаний. Для повышения качества движения выходного звена в режиме торможения асинхронного двигателя (перед остановкой) авторами статьи предложено двухрежимное управление автономным инвертором напряжения, позволяющее программно регулировать амплитуды гармоник тока статора посредством ступенчатого изменения несущей частоты и введения  $m$ -кратной «подмодуляции». Выполненные исследования позволили выявить влияние «микровибрации» ротора асинхронного двигателя на изменение величины «эффективного» коэффициента трения подвижных звеньев в направляющих производственного механизма, регулирование которого «условно уменьшает» силу трения, снижает мощность привода на преодоление сил трения звеньев при пуске и способствует повышению равномерности их движения в направляющих при торможении. Применение автономного инвертора напряжения с двухрежимным управлением позволит: улучшить формирование индивидуальных механических характеристик частотно-управляемого электропривода, расширить область применения таких систем в технологическом оборудовании, многозвенных механизмах автоматизированных производств (сбалансированных манипуляторах), работающих в зоне «малых и ползучих скоростей».

**Abstract:** The article presents the results of theoretical and experimental studies of the dry friction forces effect on the industrial mechanism motion characteristics in the low-speed zone, it provides substantiations for the use of an autonomous voltage inverter bimodal control and gives recommendations for expanding the application area of production mechanisms frequency-controlled electric drives. The random nature of change of the frictional forces between the moving parts of industrial mechanism joints during the induction motor start-up and braking makes it difficult to implement a programmable braking and reduces the accuracy of the industrial mechanism operating device positioning. Pulsating torques on the induction motor rotor during start-up and braking caused

by the stator current harmonics together with the friction torques in the contacting zones of the industrial mechanism moving links and the drop guides considerably worsen the real dynamics of the output link movement and increase the probability of the forced oscillations occurrence. To improve the quality of motion of the output link during the asynchronous motor braking mode (before stopping), the authors proposed a two-mode autonomous voltage inverter control that allows to adjust programmatically the stator current harmonics amplitudes by step-wise changing the carrier frequency and introducing an  $m$ -fold "submodulation". The performed researches made it possible to reveal the effect of the "microvibration" of an asynchronous motor rotor on the change of the "effective" friction factor value of the moving links in the industrial mechanism drop guides. The adjusting of the "effective" friction factor "conditionally reduces" the frictional force, decreases the drive power to overcome the frictional forces of the links during start-up, and improves the uniformity of their movement in the drop guides during braking. The use of an autonomous voltage inverter with bimodal control will allow to improve the formation of individual mechanical characteristics of a frequency-controlled electric drive. In addition, it will allow to expand the implementation area of the frequency-controlled electric drives in technological equipment, multi-link mechanisms of automated industry (balanced manipulators) which operate in the "low and creeping speeds" zone.

**Ключевые слова:** звено подвижности, производственный механизм, амплитуда колебаний, пуск асинхронного двигателя, торможение асинхронного двигателя, автономный инвертор напряжения, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, момент трогания, зона малой скорости.

**Key words:** moving link, industrial mechanism, oscillations amplitude, induction motor start-up, induction motor braking, autonomous voltage inverter, summary voltage harmonic components factor, start-up torque, low speed zone.

**Ведение.** Применение частотно-управляемого электропривода (ЧУЭП) производственных механизмов (ПМ) сопряжено с рядом трудностей, обусловленных, в частности, неудовлетворительной работой привода, в зоне малой скорости [1,2]. Здесь следует исходить из особенностей движения выходного вала ПМ, характеризующихся наличием трения звена подвижности в направляющих, взаимным влиянием пульсирующего момента на валу трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД) и непостоянством приведенного суммарного момента трения всех звеньев механизма, включая нагрузку. Указанные факторы в совокупности создают условия для формирования «шагового» режима работы АД и повышенной неравномерности движения выходного звена в направляющих ПМ. При этом появляется техническая сложность (по обеспечению программно задаваемого по точности позиционирования, например, рабочего органа (РО) промышленного робота (ПР)) при выполнении технологического процесса с заданным качеством. Особенность формирования такого режима работы ЧУЭП обусловлена также и изменением пульсирующих моментов на валу АД, создаваемых гармониками тока статора при протекании «несинусоидального» фазного тока частотой 0,5-20 Гц [3,4]. Для снижения влияния негативного фактора - «несинусоидальности» тока статора АД и сил трения, авторы используют двухрежимное программное управление процессом формирования выходного напряжения автономным инвертором (АИН), обеспечивающее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих  $k_T < 8\%$  тока статора АД и приемлемое качество движения РО в зоне малой скорости (ГОСТ32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы каче-

ства электрической энергии в системах электропитания общего назначения). Выбор такого управления АИН определяется также необходимостью поддержания энергосберегающих режимов работы ЧУЭП и возможностью реализации технологических требований, в части, качества движения и позиционирования РО ПМ в режиме торможения АД в системе «АИН-АД» [5,6]. Принятое авторами решение по снижению негативных факторов в работе ПМ реализовано в процессе выполнения экспериментальных исследований, что позволило заменить привод постоянного тока ПР «Электроника – НЦТМ – 01» на ЧУЭП с трехфазным короткозамкнутым АД и улучшенными технико-энергетическими характеристиками. Параметры АД 4АА50А2У3:  $P_n = 90$  Вт;  $P_s = 93,75$  ВА;  $U_{фн} = 127$  В;  $f_c = 50$  Гц;  $R_s = 37,15$  Ом;  $L_s = 0,102$  Гн;  $R_r = 25,69$  Ом;  $L_r = 0,102$  Гн;  $L_{sr} = 1,69$  Гн;  $\mu_r = 0,00025$ ;  $J_r = 0,2454 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>;  $p = 1$ .

**Постановка задачи.** В пуско-тормозных режимах работы АД ЧУЭП из-за изменения сил трения в подвижных звеньях ПМ в зоне малой скорости могут возникать неравномерности движения (колебания) выходного вала (рабочего органа), снижающие технические характеристики и выходные показатели работы привода: производительность и технологичность [7]. Анализ причин возникновения неравномерности движения ПМ и колебаний РО, поиску способов снижения их влияния на качество работы ПМ посвящено ряд работ [8-10]. Причем, число степеней свободы движения звеньев в направляющих ПМ (при анализе и проектировании) обычно определяют по расчетной схеме, приближенно отражающей конструктивные особенности исследуемого модуля (узла) в зависимости от характера изучаемого явления, цели исследования влияния трения и вида колебаний. В настоящей статье решается задача формирования

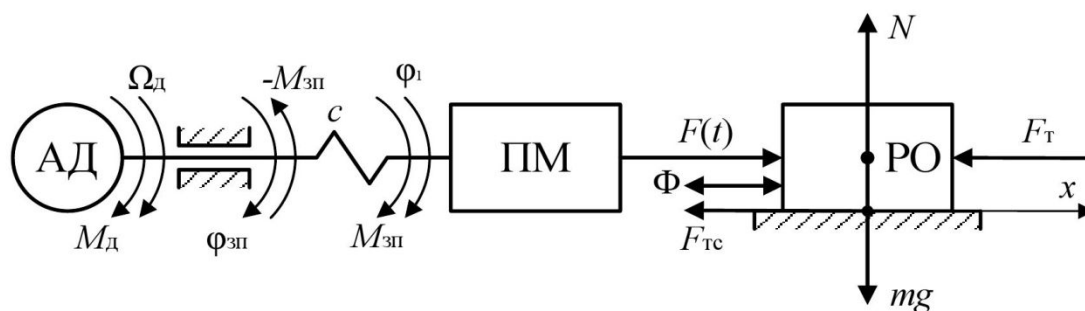


Рис. 2. Расчетная модель звена подвижности производственного механизма  
 Fig. 2. The calculation model of the industrial mechanism mobility link

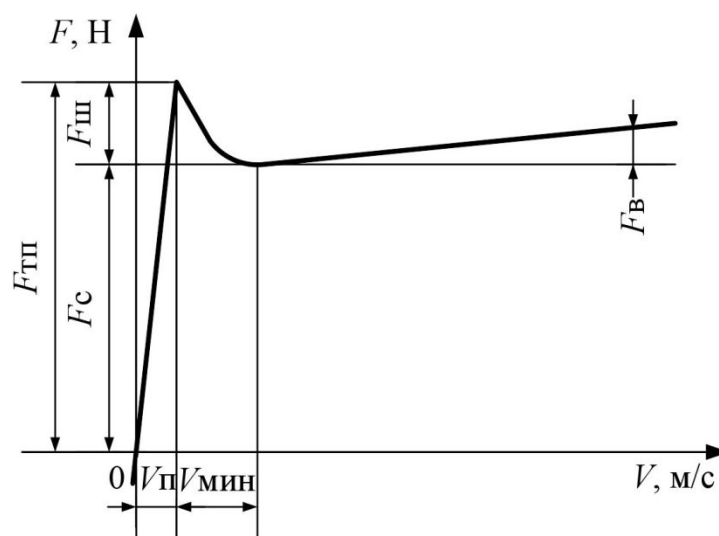


Рис. 3. Характеристика трения без разрыва в окрестности нулевой скорости движения звена в направляющих производственного механизма  
 Fig. 3. Characteristic of friction without discontinuity in the zero speed vicinity of the link in the industrial mechanism drop guides

пуско-тормозных режимов работы ЧУЭП в соответствии с индивидуальными механическими характеристиками ПМ и приемлемой неравномерностью движения РО в зоне малой скорости, не снижающими качество выполнения технологического процесса и производства конкурентоспособной продукции [11,12]. Для решения задачи исследования необходимо рассмотреть действующие моменты и силы в подвижных звеньях ПМ, разработать режимы управления АИН и обосновать условия «нейтрализации» влияния сил трения в направляющих ПМ, в частности, захватного устройства (ЗУ) промышленного робота на базе ЧУЭП с АД. Для оценки влияния момента сухого трения, как случайной величины с существенным разбросом параметров, на качество движения выходного звена (или РО ПР) в зоне малой скорости, необходимо разработать и проанализировать динамическую модель электропривода с учетом фактических сил трения в звеньях механизма.

**Решение задачи.** Для решения поставленной задачи и подтверждения теоретических положений авторами разработан экспериментальный стенд,

оснащенный датчиками и электронными устройствами специального назначения, позволяющими программно осуществлять выборку и формирование необходимых сигналов, а также реализовать задаваемые пуско-тормозные режимы работы АД ЧУЭП, включая зону малой скорости движения, например, ЗУ ПР (рис. 1).

Такие режимы работы имеют место и характерны для приводов робототехнических систем и комплексов, поскольку реализация технологических процессов обычно осуществляется приводами в повторно-кратковременных режимах S3 (с ПВ из диапазона 15...60%), включая торможение звена подвижности ПМ в зоне малой скорости [13]. Для улучшения динамики движения промежуточных звеньев, например, сборочного манипулятора, авторами рассмотрена возможность снижения влияния нелинейности коэффициента трения (вблизи состояния покоя) путем введения управляемой кратковременной «микровибрации» ротора в пуско-тормозных режимах работы АД [14-16]. Режим управляемой «микровибрации» на стенде



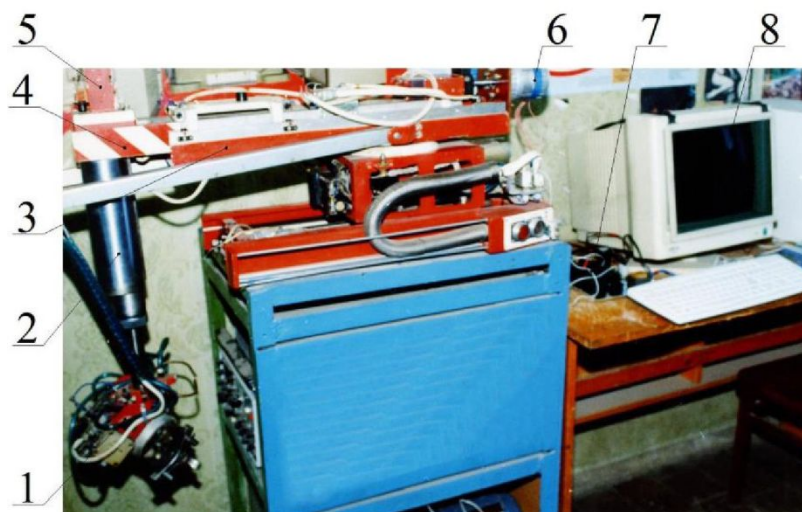


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда:

1 - захватное устройство ПР, 2 - направляющая вертикального звена подвижности; 3 - неподвижное основание; 4 - подвижное звено горизонтального перемещения; 5 - электронное устройство для измерения параметров колебаний и трения; 6 - асинхронный двигатель; 7 - автономный инвертор напряжения; 8 - монитор регистрирующего устройства с персональным компьютером

Fig. 1. General view of the experimental stand:

1 - industrial robot gripping device, 2 - vertical mobility link drop guide; 3 - fixed base; 4 - movable link of horizontal movement; 5 - electronic device for measuring the oscillations and friction parameters; 6 - asynchronous motor; 7 - autonomous voltage inverter; 8 - monitor of the recording device with a personal computer

можно задавать посредством регулирования пульсирующих моментов на валу АД за счет изменения амплитуд гармоник тока статора при работе АИН в программном режиме «*m*-подмодуляции» [4,13]. Такой подход позволяет обеспечить желаемое «изменении» сил трения в контактирующих поверхностях направляющих и звеньев подвижности в планируемой зоне перемещения и останова ЗУ (в соответствии с параметрами и требованиями технологического процесса).

Теоретическое обоснование возможности «изменения» силы трения в направляющих, в общем случае, можно получить в результате анализа расчетной модели ЧУЭП ПМ с выходным звеном подвижности РО ПР и указанием сил, действующих на него (рис. 2). В модели введены следующие обозначения:  $M_d$  – момент двигателя;  $\Omega_d$  – скорость вращения ротора АД;  $c$  – жесткость соединения ПМ с АД;  $M_{зп}$  – движущий момент на входе ПМ (момент сопротивления «минус»  $M_{зп}$ ) на валу АД;  $\varphi_1$  – угол поворота входного звена ПМ;  $\varphi_{зп}$  – угол поворота выходного вала АД;  $F(t)$  – суммарная (внешняя) движущая сила;  $F_{ТС}$  – сила трения в направляющих;  $F_T$  – сила технологического сопротивления;  $N$  – сила нормального давления РО с массой  $m$ ,  $\Phi$  – вибрационная составляющая суммарной движущей силы  $F(t)$ .

Уравнение движения звена ПМ в этом случае (вдоль продольной оси  $x$ ) можно записать в виде:

$$m\ddot{x} = F(t) - F_T - F_{ТС}. \quad (1)$$

Сила трения  $F_{ТС}$  в выражении (1) может быть представлена зависимостью, изображенной на рис. 3. Здесь показано, что в начальный момент трогания ПМ (или при смене направления движения – реверсировании) сила  $F_{ТС}$  равна силе трения покоя  $F_{ТП}$  и может быть представлена соотношением:

$$F_{ТС} = F_{ТП} = F_{Ш} + F_C, \quad (2)$$

где  $F_{ТП}$  – сила трения покоя,  $F_{Ш}$  – сила трения Штрибека [17],  $F_C$  – сила сухого трения.

С учетом выражения (2), когда сила трения покоя  $F_{ТП}$  в условиях эксплуатации ПМ может изменяться в широком диапазоне, т.е.  $F_{ТП}/F_C \approx (0,1 \dots 2,5)$ , необходимое значение внешней (суммарной движущей) силы  $F(t)$  (для сдвига РО) должно соответствовать соотношению  $F(t) > F_{ТП} + F_T$  [10]. Необходимо отметить, что при исследованиях характер зависимости силы трения покоя  $F_{ТП}$  от скорости ( $V$ ) перемещения звена подвижности различен и его следует рассматривать на примере неразрывной функции (рис. 3) [14,16,17]. Характер изменения силы трения  $F_{ТП}$  наиболее полно отражает физические процессы в механическом контакте, распределенном в плоскости между телами - подвижными звеньями ПМ, на малом участке скорости, где  $V \rightarrow 0$ . Принято, что сила трения изменяется линейно и пропорционально скорости с коэффициентом  $F_{ТП}/V_{П}$ , где  $V_{П}$  – пороговая скорость, значение которой при расчетах и моделировании обычно принимается в диапазоне  $10^{-4} - 10^{-6}$  м/с. Характеристика Штрибекова

трения  $F_{\text{ш}}$  имеет отрицательный наклон в зоне низких скоростей ( $V_{\text{мин}} - V_{\text{п}}$ ) относительного перемещения трущихся тел. Сумма сил  $F_{\text{ш}} + F_{\text{с}}$  на границе диапазона ( $0 - V_{\text{п}}$ ) малой скорости (или в окрестности линейной нулевой скорости) образует силу трения покоя  $F_{\text{тп}}$  («силу трения срыва» [13-17]). Для нарушения состояния относительного покоя твердого тела (в соединениях направляющих движения) часто используют «вибрации» тела, обеспечиваемые внешней силой  $F(t) > F_{\text{тп}}$ . Для приближенной оценки влияния «вибрации» на систему с трением используют «эффективный» коэффициент сухого трения ( $k_{\text{эф}}$ ), определяемый отношением минимального значения приложенной силы  $P$  (из соотношения  $F(t) > P \geq F_{\text{тп}}$ ) к нормальной реакции  $N$ , создаваемой массой РО, т.е.:

$$k_{\text{эф}} = P/N$$

Такое соотношение сил в направляющих ПМ можно сохранить за счет продольной составляющей  $\Phi = \Phi_0 \sin(\omega t)$  внешней силы  $F(t)$ , создаваемой основной гармоникой тока статора (рис. 2) и пульсирующими составляющими момента  $M_{3\text{п}}$ , значения которых определяются из выражения [18]:

$$M_k = ((p \cdot m_1) / (2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_1)) \cdot I_{2k}^2 \cdot (r_{2k} / s_k)$$

где  $M_k$  – пульсирующая составляющая момента от гармоники  $k$ -го порядка,  $p$  – число пар полюсов АД;  $m_1$  – число фаз статора;  $I_{2k}$  – активная составляющая тока ротора;  $r_{2k}$  – активное сопротивление обмотки ротора АД;  $s_k$  – скольжение  $k$ -ой гармоники. В этом случае пульсирующие моменты  $M_k$  в составе момента  $M_{3\text{п}}$  можно принять за внешние [16], что для случая трогания АД (начала движения РО) позволяет записать соотношение:

$$M_{3\text{п}} \approx M_{\text{сп}}$$

где  $M_{\text{сп}}$  – приведенный к валу входного звена ПМ момент сопротивления, зависмый от технологического сопротивления  $F_{\text{т}}$  и трения покоя  $F_{\text{тп}}$  подвижного звена в направляющих (рис. 2). Если в какой-то момент времени значение суммы приложенной силы  $P$  и вибрационной составляющей  $\Phi$  внешней силы  $F(t)$  становится меньше предельной силы трения покоя, т.е.:

$$P + \Phi_0 \cdot \sin(\omega t) \leq f_0 \cdot N, \quad (3)$$

то тело (или РО) будет находиться в состоянии покоя. При  $\sin(\omega t) = 1$  в выражении (3) составляющая сила  $\Phi = \Phi_0 \cdot \sin(\omega t)$  достигает максимального значения, что позволяет определить значение  $k_{\text{эф}}$  для случая «микровибрации» тела в направляющих в виде:

$$k_{\text{эф}} = P/N = f_0 \cdot (1 - \Phi_0 / (f_0 \cdot N)), \quad (4)$$

где  $f_0$  – пороговый коэффициент трения взаимодействующих звеньев - плоскостей ПМ,  $\Phi_0$  – управляемая амплитуда «микровибрации» звена ПМ.

Из выражения (4) следует, что с увеличением  $\Phi_0$  значение «эффективного» коэффициента  $k_{\text{эф}}$

уменьшается. Состояние «измененного» коэффициента трения ( $k_{\text{эф}} \rightarrow 0$ ) можно программно задавать во всех направляющих многозвенного механизма, например, пространственного манипулятора с шестью-семью степенями подвижности звеньев посредством индивидуальных частотных приводов с АИН двухрежимного управления [7]. Особенностью работы такого АИН является возможность программного формирования выходного напряжения методом ПВ ШИМ, когда значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $k_{\text{г}}$  изменяется в диапазоне от 8% до 67% в обычном режиме, а в режиме « $m$ -подмодуляции» не превышает 5 – 8% в зоне малых частот 0,5 – 20 Гц [2]. Для исследования процессов в контактирующих плоскостях соприкасающихся подвижных звеньев ПР (ПМ) выполнено математическое моделирование с использованием пакета программ MATLAB+Simulink. Модель представлена в виде графических блоков и программного кода, реализующих математические операции и взаимодействие компонентов модели в структурной схеме. При этом были использованы известные и специально разработанные блоки в Simulink, что позволило реализовать модель ЧУЭП с АД и исследовать характеристику «безразрывного» трения, показанную на рис. 3. Внутренняя работа блоков Ideal Velocity Source и Friction математической модели соответствует уравнениям [17,18]:

$$F = \begin{cases} (F_{\text{с}} + (F_{\text{тп}} - F_{\text{с}})e^{-c_v|V|})\text{sign}(V) + k_{\text{в}}V, & \text{при } |V| \geq V_{\text{п}}, \\ V \frac{k_{\text{в}}V_{\text{п}} + F_{\text{с}} + (F_{\text{тп}} - F_{\text{с}})e^{-c_vV_{\text{п}}}}{V_{\text{п}}}, & \text{при } |V| < V_{\text{п}}, \end{cases}$$

$$V = V_R - V_C,$$

где  $c_v$  – коэффициент аппроксимации перехода от трения покоя к вязкому трению принимается от 1000 до 15000;  $k_{\text{в}}$  – коэффициент вязкого трения, принимается от 0 до 50;  $V_R$  и  $V_C$  – скорости перемещения трущихся тел, передаваемые в блок Friction.

Задавая на вход  $R$  блока Friction скорость перемещения РО через датчик усилия Ideal Sensor, и соединяя вход  $C$  с неподвижным основанием, можно получить изменяемые значения силы трения. Если последние подавать на вход  $Tm$  блока Asynchronous Machine, то можно имитировать изменение сопротивления нагрузки на валу АД – сопротивление движению ПМ от трения (рис. 4). Блок Inverter в структурной схеме реализует алгоритм, разработанный на основе математической модели симплексного управления силовыми полупроводниковыми приборами СПП - ключами АИН. Вектор напряжения на выходе блока Inverter формируется под управлением сигналов ШИМ, образованных с помощью задающего сигнала [19]:

$$U_{3\text{АД}}(f, t) = \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

где  $f$  – требуемая частота «квазисинусоидального» выходного напряжения блока,  $t$  – текущее время симуляции и модулирующего треугольного



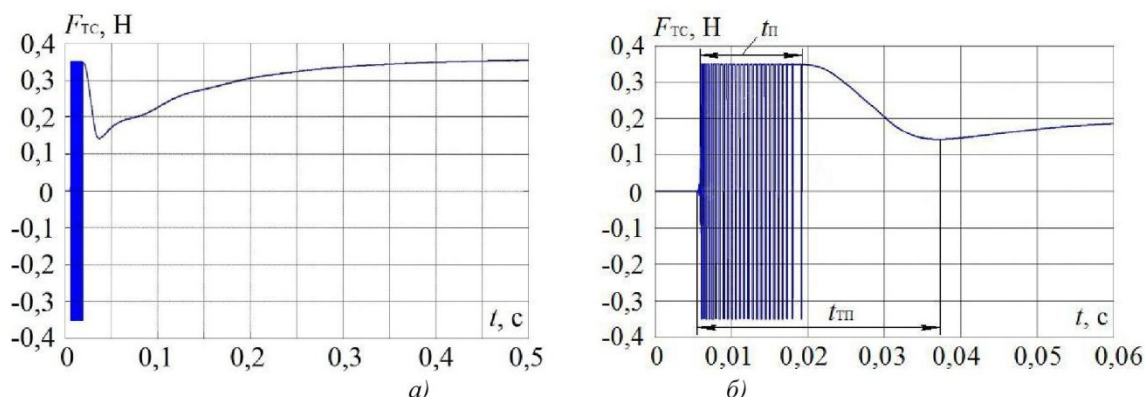


Рис. 6. Характеристики процесса «срыва» силы трения покоя:  
общая картина изменения силы трения (а) и расклада временных составляющих на  $t_P$  и  $t_{TP}$  с учетом времени  $t_{CC}$  в процессе формирования «срыва» (б)

Fig. 6. Characteristics of the static friction force "stall" process:  
the general dependence of the frictional force change (a) and the  $t_P$  and  $t_{TP}$  time components of taking into account the time  $t_{CC}$  at the "stall" process formation (b)

Таблица 1

$m$	$f$ , Гц	$t_P$ , мс	$t_{TP}$ , мс	$\Omega$ , рад/с
1	15	11,5	16	25,6
1	10	9	14	35,9
1	5	6	13	37
4	15	—	—	0
4	10	25,2	31,7	21,5
4	5	22,5	29,5	21,7

сигнала  $U_{ЗД}$ , определяемого зависимостью:

$$U_{TP}(f, t) = \frac{2}{\pi} \arccos(\cos(2\pi \cdot f \cdot 3^m \cdot t))$$

где  $m = 1, 2, 3 \dots m_{\text{МАКС}}$  – коэффициент частоты модуляции, а величина  $m_{\text{МАКС}}$  – некоторое целое число, необходимое для ограничения значения частоты модулирующего сигнала для случая программно-аппаратной реализации данного алгоритма.

На рисунке 5 приведены графические зависимости изменения угловой скорости ротора, полученные в результате моделирования режима пуска АД от нуля до  $\Omega = 25$  рад/с при задании параметров: частота тока статора  $f = 15$  Гц, коэффициент «подмодуляции»  $m = 1$  и значение коэффициента  $k_T > 8\%$ . При таких условиях пуск АД осуществляется при «квазисинусоидальном» выходном напряжении АИН, когда значение пульсирующего момента  $M_{ЗП}$  (момента трогания) несколько превышает приведенный к валу входного звена ПМ момент сопротивления  $M_{СП}$ , т.е.  $M_{ЗП} > M_{СП}$ , и в узле сопрягаемых звеньев механизма создается соотношение сил  $F(t) > F_{TP}$ , сопровождаемое движением РО ПМ.

Моделирование процесса «срыва», когда возникает соотношение сил  $F(t) > F_{TP}$  в зоне трущихся поверхностей звеньев, приведено на рисунке 5,б. Анализ зависимости  $F_{TC}(t)$  (рис. 6,а) позволяет выделить некоторый временной промежуток  $t_{CC}$  (рис.

5,б) срабатывания системы ( $t_{CC} = 0,006$  с), переходящий во временной участок  $t_P$  (рис. 6,б), характеризующийся появлением внутреннего колебательного процесса при изменении силы  $F_{TP}$  и временем преодоления зоны нелинейного трения за  $t_P = 0,014$  с.

На рисунке 6,б представлены «условные» соотношения временных  $t_P$ ,  $t_{TP}$  и  $t_{CC}$  параметров действующих сил ( $F_{TP}$  и  $F_{TP}$  в контактной зоне движущего звена ПР при введении «микровибрации» вала АД под влиянием пульсирующих моментов от гармоник тока статора, где общее время  $t_{TP}$  определяется суммой составляющих  $t_P$  и  $t_{CC}$ . Используя принятую схему измерения параметров модели (рис. 4), были выполнены исследования с частотами тока статора  $f = 10$  Гц,  $f = 5$  Гц при предельных изменениях коэффициента « $m$ -подмодуляции» соответственно  $m = 1$  и  $m = 4$ .

Результаты измерений контролируемых параметров сведены в таблицу 1.

Анализ временных параметров действующих сил  $F_i$  в зоне контактирующих поверхностей движущего звена ПМ, частоты тока статора  $f$  и вращения вала  $\Omega$  при смене коэффициента « $m$ -подмодуляции» режимов управления (см. табл.) позволяет отдать предпочтение режиму с  $m = 1$ , поскольку показатели  $t_P$ ,  $t_{TP}$  в сравнении с аналогичными показателями при  $m = 4$  в 1,5 - 2 раза меньше. Следует отметить, что с уменьшением частоты  $f$  тока ста-

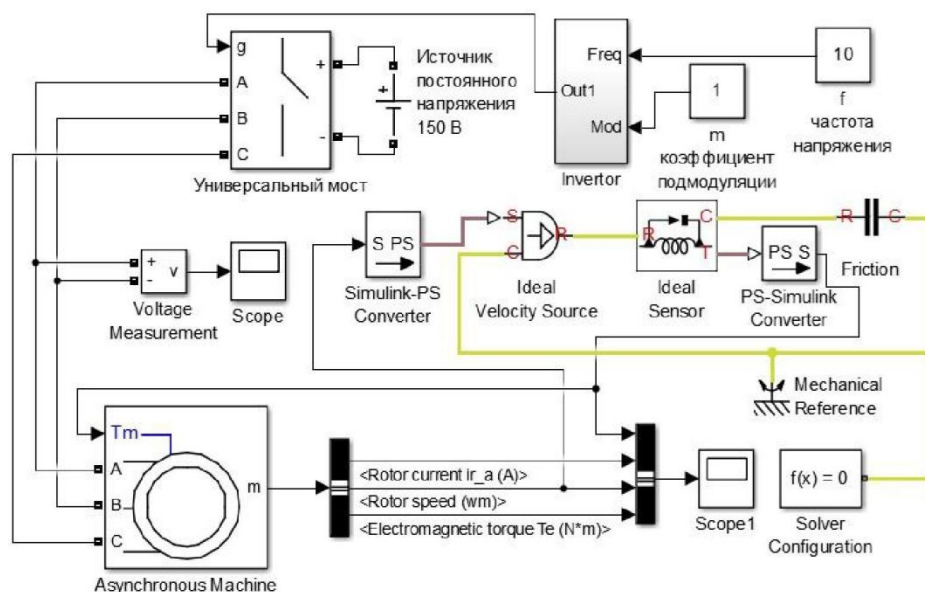


Рис. 4. Структурная схема расчетной модели звена подвижности производственного механизма в программном пакете MATLAB+Simulink

Fig. 4. Structural scheme of the calculation model of the industrial mechanism mobility link in the software package MATLAB + Simulink

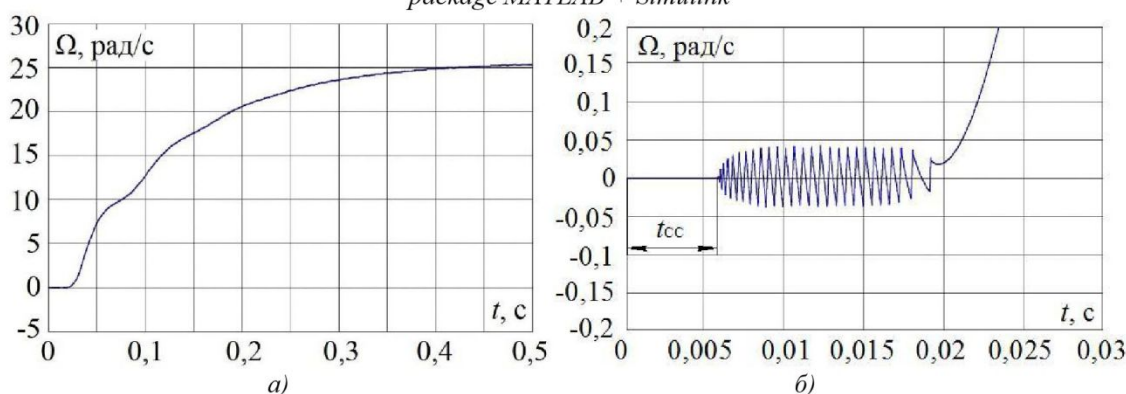


Рис. 5. Характеристики режима пуска асинхронного двигателя при  $f = 15$  Гц,  $m = 1$ : зависимость изменения частоты вращения ротора (а) и формирования колебаний в зоне соединения звеньев в состоянии «срыва» (б)

Fig. 5. Characteristics of the asynchronous motor start-up mode at  $f = 15$  Hz,  $m = 1$ : the dependence of the rotor speed change (a) and the oscillations formation in the links connection zone at the "stall" state (b)

тора увеличивается амплитуда пульсирующего момента  $M_{ЭП}$  за счет гармоник, а частота вращения вала АД незначительно повышается. Следовательно, влияние «вибрационной линеаризации» на силы трения в ПМ (в режиме управления АИН с регулируемой «подмодуляцией») подтверждается, а сравнение видов управления дает предпочтение режиму с «подмодуляцией» при коэффициенте  $m = 1$ .

Таким образом, реализация двухрежимного управления работой АИН с целесообразными взаимными переходами от  $m=1$  до  $m=4$  обеспечивает исполнение расчетных значений параметров технологического процесса с учетом фактических сил трения ПМ, создаёт предпосылки к созданию современного обрабатывающего оборудования с ЧУЭП и производству более качественной и конкурентоспособной продукции.

Экспериментальная оценка силовых и временных составляющих процесса трогания (остановки) ПМ (подвижного звена горизонтального перемещения 4 в неподвижном основании 3, рис. 1) подтвердила адекватность результатов математического и физического моделирования трения на этапы формирования скорости движения ПМ. Различия в полученных параметрах характеристик процесса трения звена ПМ указанными методами исследования имеет место и не превышает 10-27% [4,13,14], что связано с нестабильностью параметров характеристик трения, особенностями постановки и выполнения эксперимента, а также определяется надлежащим выбором и применением контрольно-измерительной аппаратуры.

**Заключение.** Краткий анализ содержания



представленной статьи и выполненных исследований позволяет заключить:

1. Неоднозначность фактического коэффициента трения звена подвижности в направляющих ПМ сопровождается изменением момента (усилий) трения, что затрудняет техническое обеспечение программно задаваемых параметров технологического процесса, например, равномерности движения выходного звена и точности остановки РО.

2. Для формирования состояния «эффективного» коэффициента сухого трения ( $k_{эф}$ ) в направляющих движения звена ПМ целесообразно использовать двухрежимное управление АИН, позволяющее программно регулировать амплитуду гармоник тока статора и обеспечивать управляемую

«микровибрацию» ротора за счет пульсирующих моментов на валу АД.

3. Регулирование амплитуд гармоник тока АД влияет на время формирования действующих моментов (сил) «срывного» уровня и изменяет их соотношения в контактных зонах звена и направляющих, а также изменяет их временные составляющие и частоту колебаний при ступенчатом изменении несущей частоты АИН и « $m$ -подмодуляции» с кратностью  $m = 1 \dots 4$ .

Полученные результаты моделирования могут быть использованы для коррекции задаваемых параметров технологического процесса и режимов работы системы управления ЧУЭП ПМ автоматизированного производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – Москва, АCADEMA, 2004. – 256 с.
2. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
3. Карнаухов Н.Ф. Коррекция механических характеристик частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма/ Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, Д.А. Статовой// Наука, техника и технология XXI века (НТТ-2013): мат. V Междунар. науч.-техн. конф./ Кабардино-Балкарский университет. – Нальчик, 2013. – С. 71 – 75.
4. Филимонов М.Н. Двухрежимное управление автономным инвертором напряжения частотного привода производственного механизма в зоне малой скорости / М.Н. Филимонов, Н.Ф. Карнаухов, Д.А. Смяцкий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61. – № 2. – С. 70 – 76.
5. Мещеряков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / В.Н. Мещеряков, Д.С. Сибирцев // Энергосбережение и эффективность в технических системах: мат. IV Междунар. Науч.-Техн. конф. студентов, молодых учёных и специалистов/ Тамбовский гос. техн. ун-т. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2017. – С. 137.
6. Карнаухов Н.Ф. Установка для демонстрации рекламно-информационного материала и устройство управления перемещением носителя информации / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, С.А. Ушаков // Патент на полезную модель № 36914 РФ. Оpubл. 27.03.2004 г. Бюл. № 9.
7. Сбалансированные манипуляторы / И.Л. Владов, В.Н. Данилевский, П.Б. Ионов и др.; Под ред. П.Н. Белянина. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.
8. X. Zheng, L. Song, and P. Hongying, «Study of Five-level diodes-clamped Inverter Modulation Technology Based on Three-harmonic Injection Method», EMEIT-2012., pp.1973 – 1976.
9. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: Учеб. пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 608 с.
10. Филонов И.П. Теория механизмов, машин и манипуляторов / И.П. Филонов, П.П. Анципорович, В.К. Акулич. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 656 с.
11. Бушуев В.В. Направления развития мирового станкостроения / В.В. Бушуев, Ф.С. Сабилов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – №1(9). – С. 24 – 30.
12. Коломиец А.П. Электропривод и электрооборудование / А.П. Коломиец, Н.П. Кондратьева, И.П. Владыкин, С.И. Юран. – М.: КолосС, 2006. – 328 с.
13. Карнаухов Н.Ф. Моделирование режима торможения асинхронного двигателя частотного электропривода с использованием гармоник тока статора / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, Д.А. Статовой, Ф.В. Бонилья // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 16, № 1 (84). – С. 87 – 98.
14. Карнаухов Н.Ф. Управляемая вибрация звеньев подвижности производственного механизма / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, Р.С. Мироненко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 3(90). – Т. 17. – С. 78 – 88.
15. J. Abdo, M. Tahat The Effect of Frequency and Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Metals. // Tribology International, Volume 41, Issue 4, April 2008, Pages 307 – 314.



16. Федоренко И.Я. Особенности проявления эффективного снижения трения в лотковых вибрационных дозаторах / И.Я. Федоренко, У.К. Сабиев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – №6 (80). – С. 82 – 85.
17. K. J. Astrom, C. C. de Wit. Revisiting the LuGre friction model. *IEEE Control Systems Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, 28 (6), pp.101-114.
18. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Х.: Основа, 2004 – 210 с. – Мова рос.
19. Изосимов Д.Б. Алгоритмы и системы цифрового управления электроприводами переменного тока / Д.Б. Изосимов, В.Ф. Козаченко // *Электротехника*, 1999, № 4. – С. 41 – 51.

## REFERENCES

1. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energosberegayushhij asinxronnyj elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow, ACADEMA Publ., 2004. p.256 (Rus)
2. Pozdeev A.D. *Elektromagnitnye i elektromexanicheskie processy v chastotno-reguliruemyyh asinxronnyh elektroprivodah* [Electromagnetic and electromechanical processes in frequency controlled asynchronous electric drives]. Cheboksary, Chuvashskiy universitet Publ., 1998. p.172 (Rus)
3. Karnaukhov N.F., Filimonov M.N., Statovoy D.A. *Korreksiya mekhanicheskikh kharakteristik chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitelnogo mekhanizma* [Correction of the technological machines frequency drive mechanical characteristics in the low speed zone of the actuator movement]. *Nauka tekhnika i tekhnologiya XXI veka (NTT-2013): materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Science, engineering and technology of the XXI century (SET-2013): materials of the V International Scientific and Technical Conference]. Nalchik, Kabardino-Balkarian University Publ., 2013. pp. 71 - 75. (Rus)
4. Filimonov M.N., Karnaukhov N.F., Smyatsky D.A. *Dvukhrezhimnoe upravlenie avtonomnym invertorom napryazheniya chastotnogo privoda proizvodstvennogo mekhanizma v zone maloy skorosti*. [Bimodal control of the stand-alone voltage inverter of variable-frequency drive in production devices in the low-speed area]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2018. Vol. 61. No. 2. pp. 70-76. (Rus)
5. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. *Energosberegayushchij asinhronnyj elektroprivod*. [Energy-saving asynchronous electric drive]. *Energosberezhenie i effektivnost v tekhnicheskikh sistemah: materialy IV Mezhdunarodnoy Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, molodyh uchyonyh i spetsialistov*, Tambovskiy gosudarstvenniy tekhnicheskij universitet [Energy saving and efficiency in technical systems: materials of the IV International Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists, Tambov State Technical University]. Tambov, Pershina R.V. Publ., 2017 p. 137. (Rus)
6. Karnaukhov N.F., Filimonov M.N., Ushakov S.A. *Ustanovka dlya demonstratsii reklamno-informatsionnogo materiala i ustrojstvo upravleniya peremeshheniem nositelya informatsii* [Equipment for demonstration advertising information material and device for the movement control of the information carrier]. Patent RF no. 36914. 2004. (Rus)
7. Vladov I.L., Danilevsky V.N., Ionov P.B. etc. *Sbalansirovannyye manipulyatory* [Balanced manipulators] Ed. P.N. Belyanin. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988. p.264 (Rus)
8. X. Zheng L. Song, and P. Hongying, «Study of Five-level diodes-clamped Inverter Modulation Technology Based on Three-harmonic Injection Method», *EMEIT-2012.*, pp.1973 – 1976.
9. Lukinov A.P. *Proektirovaniye mexatronnykh i robototekhnicheskikh ustrojstv* [Mechatronic and robotic devices engineering]. St. Petersburg, "Lan" Publ., 2012. p.608 (Rus)
10. Filonov I.P., Antsyporovich P.P., Akulich V.K. *Teoriya mekhanizmov, mashin i manipulyatorov* [Theory of mechanisms, machines and manipulators]. Dizajn PRO pbl., 1998. p.656 (Rus)
11. Bushuev V.V., Sabirov F.S. *Napravleniya razvitiya mirovogo stankostroyeniya* [Trends in world machine tool industry]. *Vestnik MGTU «Stankin» journal*, 2010. No. 1 (9). pp. 24-30. (Rus)
12. Kolomiets A.P., Kondratieva N.P., Vladikin I.P., Yuran S.I. *Elektroprivod i ehlektrooborudovanie* [Electric drive and electrical equipment]. Moscow, KolosS Publ., 2006. p.328 (Rus)
13. Karnaukhov N.F., Filimonov M.N., Statutova D.A., Bonilla F.V. *Modelirovaniye rezhima tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya chastotnogo ehlektroprivoda s ispol'zovaniem garmonik toka statora* [Modeling the braking behavior of an induction motor of a frequency drive by using stator current harmonics]. *Vestnik DGTU*, 2016. Vol. 16. No. 1 (84). pp. 87-98. (Rus)

14. Karnaukhov N.F., Filimonov M.N., Mironenko R.S. Upravlyayemaya vibratsiya zven'ev podvizhnosti proizvodstvennogo mekhanizma [Controllable vibration of the joints of mobility of the industrial mechanism]. Vestnik DGTU, 2017. No. 3 (90). Vol. 17. p.78 - 88. (Rus)
15. J. Abdo, M. Tahat The Effect of Frequency and Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Metals. Tribology International, Volume 41, Issue 4, April 2008, Pages 307-314.
16. Fedorenko I.Ya. Sabiev U.K. Osobennosti proyavleniya effektivnogo snizheniya treniya v lotkovykh vibratsionnykh dozatorah [Features of effective friction reduction in tray vibration dispensers]. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2011. No. 6 (80). pp. 82-85. (Rus)
17. K.J. Astrom, C.C. de Wit. Revisiting the LuGre friction model. IEEE Control Systems Magazine, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, 28 (6), pp.101-114.
18. Perelmuter V.M. Pryamoe upravlenie momentom i tokom dvigatelej peremennogo toka [Direct control of AC motors torque and current]. Osnova Publ., 2004. p.210 (Rus)
19. Izosimov D.B., Kozachenko V.F. Algoritmy i sistemy tsifrovogo upravleniya ehlektroprivodami peremennogo toka [Algorithms and systems of alternating current electric drives digital control]. Electrical Engineering, 1999. No. 4. pp. 41 - 51. (Rus)

Поступило в редакцию 02.04.2018

Received 02.04.2018