

# АЛГОРИТМ РАБОТЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ЗАВИСИМОГО ИНВЕРТОРА ТОКА В ЗОНЕ НИЗКИХ СКОРОСТЕЙ

A MANAGEMENT ALGORITHM OF SENSORLESS LOAD COMMUTATED INVERTER IN THE LOW-VELOCITY ZONE УДК 62-83:621.313.3

**Е.Г. ПАЙМУРЗОВ**

Магистр техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Заведующий сектором цифровых систем управления отдела электропривода ООО НПП «ЭКРА».

Чебоксары  
Paymurzov-E@ekra.ru

**E. PAYMURZOV**

Master of engineering and technology in the direction of «Electrical engineering, electromechanics and electrotechnology»  
The subdivision manager of electric drive department of the research and development EKRA Ltd.

Cheboksary

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

зависимый инвертор тока, бездатчиковое управление, высоковольтный синхронный электродвигатель

**KEYWORDS:**

load commutated inverter, sensorless control, medium voltage synchronous motor

В статье рассматривается алгоритм работы системы управления тиристорного преобразователя частоты по схеме зависимого инвертора тока в зоне низких скоростей при пуске синхронного электродвигателя. Основной особенностью алгоритма является зависимость работы режимов независимого и зависимого от вращения ротора задания частоты коммутации, а также отсутствие датчика положения ротора. Анализ результатов моделирования и практического опыта работы на реальных объектах показал, что предложенный алгоритм управления бездатчиковым зависимым инвертором тока обеспечивает устойчивый частотный пуск высоковольтного синхронного электродвигателя с вращением в строго заданную сторону и отсутствием колебаний ротора, с пусковым током, не превышающим 0,8 номинального тока электродвигателя механизма, обладающего большим моментом инерции, или с пусковым током, не превышающим 1,2 номинального тока электродвигателя механизма, обладающего большим моментом нагрузки.

This article describes a management algorithm of thyristor load commutated inverter in the low-velocity zone at start of synchronous motor. The main feature of the algorithm is the dependence of the work mode with independent and dependent on the rotor position switching frequency, as well as the absence of the rotor position sensor.

The analysis of results of modeling and practical experience on real objects has shown that the offered algorithm of sensorless management of load commutated inverter provides steady frequency start-up of the medium voltage synchronous electric motor with rotation in strictly set party and absence of fluctuations of a rotor, with the starting current which is not exceeding 0,8 rated current of the electric motor of the mechanism, possessing the large moment of inertia, or with the starting current which is not exceeding 1,2 rated current of the electric motor of the mechanism, possessing the large moment of loading.

Мощные высоковольтные синхронные электродвигатели (СЭД) широко распространены в нефтегазовой отрасли. Тиристорный преобразователь частоты по схеме зависимого инвертора тока (ПЧЗ) является наиболее простым и экономически выгодным схематехническим решением, обеспечивающим частотный пуск СЭД. При этом система «ПЧЗ – СЭД» образует систему вентильного электропривода, где инвертор тока выполняет функции, аналогичные коммутатору электродвигателя постоянного тока. Таким образом, коммутации тиристоров инвертора тока должны производиться по угловому положению ротора СЭД.

В бездатчиковом исполнении устройства ПЧЗ управление тиристорами инвертора тока выполняется по сигналам напряжений на фазах электродвигателя, выделяя из них противо-эДС  $E$  или поток [1-4].

Коммутация тиристоров инвертора бездатчикового устройства ПЧЗ в зоне низких скоростей может осуществляться:

- в режиме независимого задания частоты коммутации (НЗЧК) [2, 4];
- в режиме зависимого от вращения ротора задания частоты коммутации (ЗЗЧК) [1-4].

Работа системы управления (СУ) в режиме ЗЗЧК позволяет получить максимальный средний момент, развиваемый СЭД. Для многих механизмов недопустимо вращение в противоположную заданную сторону, но на малых частотах вращения ротора противо-эДС незначительна

и, соответственно, затруднено получение достоверных сигналов для управления инвертором тока. Искаженная информация о фактическом положении ротора может вызвать вращение в противоположную сторону, которое будет поддерживаться СУ из-за того, что в режиме ЗЗЧК коммутация тиристоров инвертора тока осуществляется по сигналам, полученным в результате воздействия инвертора тока на СЭД.

Средняя скорость вращения ротора при работе СУ в режиме НЗЧК всегда положительная, но могут присутствовать колебания ротора, приводящие к ударам в механизме.

Устройства пуска СЭД на базе зависимого инвертора тока по работе алгоритмов управления инвертором в зоне низких скоростей можно разделить на работающие:

- только в режиме НЗЧК [2];
- только в режиме ЗЗЧК [1, 3];
- с последовательной работой режимов [4]:
  - в режиме НЗЧК на первоначальном этапе;
  - в режиме ЗЗЧК на последующих этапах.

Автором предлагается параллельная работа обоих режимов, при которой коммутация тиристоров инвертора будет осуществляться в режиме НЗЧК, а сигналы режима ЗЗЧК будут использоваться для коррекции режима НЗЧК. Таким образом, режим НЗЧК становится частично зависимым от фактического положения ротора.

Основными требованиями к разработке

оптимального закона управления инвертором в зоне низких скоростей являются:

- устранение колебаний ротора;
- вращение только в заданную сторону;
- работа в широком диапазоне изменения моментов нагрузки и инерции;
- невысокая стоимость:
  - бездатчиковое определение положения ротора;
  - малая индуктивность  $L_d$  реакторов звена постоянного тока;
  - использование штатных устройств возбуждения СЭД;
  - минимальный набор органов измерения.

Работа в широком диапазоне изменения моментов нагрузки и инерции позволяет упростить настройку СУ. В большинстве случаев установка датчика положения ротора усложняет конструкцию СЭД и трудноисполнима для СЭД, находящихся в эксплуатации. Малая индуктивность  $L_d$  реакторов звена постоянного тока, составляющая (20-30) % от индуктивности намагничивания СЭД, вызывает существенное увеличение влияния сетевого напряжения и колебания угла коммутации, что, в целом, усложняет выделение информации о противо-эДС СЭД в зоне низких скоростей. Использование штатных устройств возбуждения СЭД не позволяет определять положение ротора по реакции напряжения обмотки возбуждения, как предложено в [3]. Ограниченное количество органов измерения усложняет алгоритмы управления. ►

Предлагаемый автором алгоритм позволяет выполнить все вышеприведенные требования.

Функциональная схема устройства приведена на рис. 1. Последовательность коммутации плечами инвертора определяется номерами тиристоров.

Рассмотрим выражение для электромагнитного момента неавтоиндукционного СЭД при двухфазном режиме работы, которое имеет вид [2]:

$$M = k \cdot I_{cm} \cdot I_{pom} \cdot \sin(\Psi) \quad (1)$$

где  $I_{cm}$  – амплитуда вектора тока  $\vec{I}_{cm}$  в двух фазах статора;  $I_{pom}$  – амплитуда вектора тока ротора  $\vec{I}_{pom}$ ;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $\Psi$  – угол между магнитной осью ротора и магнитной осью статора при выбранной проводящей паре тиристоров инвертора. При осуществлении очередной коммутации тиристоров инвертора вектор тока статора  $\vec{I}_{cm}$  скачкообразно изменяет свое направление на угол минус  $\pi/3$ .

Частным случаем режима НЗЧК является шаговый режим, в котором угол  $\Psi$  изменяется в диапазоне:

$$5\pi/6 \leq \Psi \leq 7\pi/6 \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что при прохождении точки  $\Psi = \pi$  момент меняет знак, а за счет момента инерции ротор пересекает равновесную точку  $\Psi = \pi$ , и возникает отрицательный момент, заставляющий вернуться ротор в нулевую точку. Это вызывает колебания, приводящие к механическому удару в редукторе механизма.

Из (1) и работы каждого плеча инвертора с соседним противоположным плечом на угловом интервале, равном  $\pi/3$ , следует, что для получения наибольшего среднего момента СУ должна формировать изменение угла  $\Psi$  в пределах:

$$\pi/3 \leq \Psi \leq 2\pi/3 \quad (3)$$

Уравнение движения ротора СЭД для одной коммутации, записанное в функции угла  $\Psi$ , имеет вид:

$$M - M_{нагр.} = J \frac{d^2\Psi}{dt^2} \quad (4)$$

где  $M_{нагр.}$  – момент нагрузки;  $J$  – момент инерции системы «СЭД-Механизм».

Выражения для фазных противо-эДС статора  $E_a^m$ ,  $E_b^m$ ,  $E_c^m$  первой гармоники имеют вид:

$$E_a^m = E_m^m \sin(\Theta); E_b^m = E_m^m \sin(\Theta - 2\pi/3); \quad (5)$$

$$E_c^m = E_m^m \sin(\Theta + 2\pi/3)$$

где  $E_m^m$  – амплитуда фазного противо-эДС, а угол  $\Theta$  связан с углом  $\Psi$  следующим выражением:

$$\Theta = \Psi - \pi/6 \quad (6)$$

Разница в  $\pi/6$  между углами  $\Theta$  и  $\Psi$  вызвана двухфазным режимом работы инвертора тока, поэтому электромагнитный момент по форме совпадает с линейным напряжением работающих фаз СЭД.

Работу зависимого инвертора тока принято оценивать углом опережения  $\beta$ . При угле опережения  $\beta=0$  считается, что средний электромагнитный момент, развиваемый СЭД, максимален, тогда согласно (1) и (3) получается следующая взаимосвязь между углом опережения  $\beta$  и углом  $\Psi$ :

$$\beta = -\Psi + \pi/3 \quad (7)$$

В режиме НЗЧК угол опережения  $\beta^{НЗЧК}$  изменяется в диапазоне:

$$0 \leq \beta^{НЗЧК} \leq -5\pi/6 \quad (8)$$

В режиме ЗЗЧК СУ должна формировать наибольший средний момент, тогда согласно (3) и (7) угол опережения  $\beta^{ЗЗЧК}$  должен задаваться:

$$\beta^{ЗЗЧК} = 0 \quad (9)$$

На рис. 2 показаны кривые фазных противо-эДС и кривая электромагнитного момента для случая, когда тиристоры Q6 и Q1 согласно рис. 1 находятся в проводящем состоянии. Также на рис. 2 показана кривая среднего электромагнитного момента, развиваемого СЭД, который формируется в случае, если все коммутации тиристоров инвертора будут производиться с углом опережения  $\beta=0$ .

Все величины даны в относительных единицах. Выражения приведения фазных противо-эДС к относительным единицам имеют следующий вид:

$$e_a^m = \frac{E_a^m}{E_m^m} = \sin(\Theta);$$

$$e_b^m = \frac{E_b^m}{E_m^m} = \sin(\Theta - 2\pi/3);$$

$$e_c^m = \frac{E_c^m}{E_m^m} = \sin(\Theta + 2\pi/3)$$

Выражения приведения электромагнитного момента к относительным единицам имеют следующий вид:

$$m = \frac{\sqrt{3} \cdot M}{k \cdot I_{cm} \cdot I_{pom}} = \sqrt{3} \cdot \sin(\Psi)$$

Из анализа (1)-(9) и рис. 2 видно, что угол  $\beta^{ЗЗЧК}$  опережает угол  $\beta^{НЗЧК}$ . В предлагаемом алгоритме опережение углом угла используется для коррекции последнего, т.е. режим НЗЧК частично становится зависимым от положения ротора. Благодаря тому, что следующая коммутация определяется режимом НЗЧК, устраняется возможность вращения в противоположную заданную сторону. Совместная работа двух режимов позволяет получить средний момент, который не приведет к возникновению колебаний ротора.

Рассмотрим более подробно работу предлагаемого алгоритма. Функциональная схема алгоритма работы СУ в зоне низких скоростей показана на рис. 3.

В зоне низких скоростей (до 4-7 Гц) противо-эДС СЭД недостаточна для осуществления естественной коммутации (ЕК) и приходится прибегать к принудительной коммутации тиристоров инвертора. Режим ЕК является частным случаем режима ЗЗЧК. В дальнейшем за работу инвертора в режиме ЗЗЧК примем работу инвертора в режиме ЗЗЧК с принудительной коммутацией.

БФНЗ предназначен для формирования необходимой траектории разгона в области малых частот и представляет собой задачник интенсивности частоты.

ГТН предназначен для организации системы трехфазных сигналов, необходимых для СИФУ<sup>НЗЧК</sup>. На вход ГТН поступает откорректированный угол  $\Theta^{НЗЧК}$ , состоящий из двух составляющих: угла  $\Theta^{НЗЧК}$ , формируемого в функции угловой скорости, ►

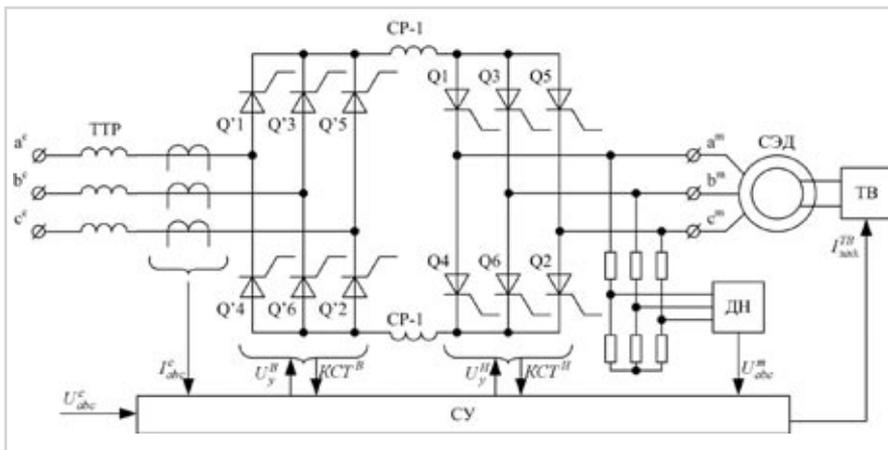


Рис. 1 Функциональная схема устройства:

ТТР – трехфазный токоограничивающий реактор; CP-1, CP-2 – сглаживающие реакторы в звене постоянного тока; ДН – датчик напряжения; ТВ – тиристорный возбудитель; KCT<sup>В</sup> и KCT<sup>И</sup> – контроль состояния тиристоров выпрямителя и инвертора соответственно; Q1-Q6 – тиристоры выпрямителя; Q1-Q6 – тиристоры инвертора; U<sub>y</sub><sup>И</sup> и U<sub>y</sub><sup>В</sup> – импульсы управления тиристорами выпрямителя и инвертора соответственно; U<sub>abc</sub><sup>с</sup> – линейные напряжения питающей сети; U<sub>abc</sub><sup>м</sup> – фазные токи со стороны питающей сети; U<sub>abc</sub><sup>м</sup> – линейные напряжения статора СЭД; I<sub>наз</sub><sup>В</sup> – ток задания ТВ.

независимой от положения ротора, и угла  $\Theta_{\text{КОРРЕКЦИИ}}^{\text{НЗЧК}}$  косвенно связанного с фактическим положением ротора СЭД. За счет того, что ГТН формирует систему трехфазных сигналов прямой последовательности, обеспечивается вращение в строго заданную сторону. Работа алгоритма коррекции не вносит изменения в направление вращения из-за того, что коррекция угла, поступающего на вход ГТН, не вызывает изменения в чередовании трехфазных сигналов и не превышает угол в  $\pi/3$ , что не позволяет пропустить очередную коммутацию согласно номерам тиристор-ров по рис. 1.

НО представляет орган сравнения, срабатывающий при равенстве номера плеча инвертора  $N_{\text{соед. тр.}}^{\text{НЗЧК}}$ , коммутация которого должна быть следующей для режима НЗЧК, и номера плеча инвертора  $N_{\text{тр.}}^{\text{ЗЗЧК}}$ , коммутация которого происходила бы в данный момент времени для режима ЗЗЧК. Сигнал с выхода НО  $U_{\text{НО}}$  является одним из условий запуска процесса коррекции.

УОМВР необходим для устранения возможных некорректных вычислений положения ротора, особенно при осуществлении первых коммутаций. УОМВР представляет собой блок сравнения длительности управляющего импульса с минимальной длительностью, которая линейно зависит от угловой частоты  $\omega^{\text{НЗЧК}}$  режима НЗЧК. При превышении длительности управляющего импульса, коммутация которого была последней, минимальной заданной длительности сигнал  $U_{\text{т.н.}}^{\text{НЗЧК}}$  устанавливается в лог. «1» и является вторым условием запуска процесса коррекции.

УОНПР работает за счет измерения и обработки напряжений, наведенных в обмотках статора при подаче напряжения на обмотку возбуждения СЭД. Выходом УОНПР является угол  $\Theta_0$  начального положения ротора.

БВС вычисляет угловую скорость  $\omega_U$  вращения ротора СЭД путем измерения периодов линейных напряжений статора.

БПР отвечает за определение момента перехода из режима НЗЧК в режим ЗЗЧК, а также за переход в режим ЕК. Критерием перехода в режим ЗЗЧК является определение вращения ротора в необходимую сторону, которое вычисляется за счет определения прямого чередования фаз противо-эдс СЭД. Переход в режим ЕК происходит при превышении угловой скорости вращения ротора величины перехода, обычно составляющей (5-7) Гц. Выходом БПР является сигнал  $U_{\text{режимы работы инвертора}}$ , осуществляющий переход СУ инвертором из одного режима работы в другой. Блоки, участвующие в процессе параллельной работы режимов НЗЧК и ЗЗЧК, перестают работать при переходе в режим ЗЗЧК, а блоки, участвующие в работе режима ЗЗЧК, перестают работать при переходе в режим ЕК.

Сигнал  $U_{\text{СТАРТ}}$  является стартовым сигналом работы СУ.

Сигнал  $U_{\text{досрочная коммутация}}$  — это сигнал, передний фронт которого запускает процесс коррекции режима НЗЧК. Передний фронт сигнала  $U_{\text{досрочная коммутация}}$  загружает в регистр

новое значение номера тиристорного плеча, коммутация которого должна быть осуществлена досрочно. Новое значение регистра приводит к переключению коммутатора угловой коррекции, и сигнал  $\Theta_{\text{КОРРЕКЦИИ}}^{\text{НЗЧК}}$  принимает новое значение. Также передний фронт сигнала  $U_{\text{досрочная коммутация}}$  сбрасывает значение интегратора в ноль. Таким образом, происходит установка начальных ненулевых условий интегратора:

$$\Theta^{\text{НЗЧК}} = \Theta_{\text{И}}^{\text{НЗЧК}} + \Theta_{\text{КОРРЕКЦИИ}}^{\text{НЗЧК}} = 0 + \Theta_{\text{КОРРЕКЦИИ}}^{\text{НЗЧК}} = \Theta_{\text{КОРРЕКЦИИ}}^{\text{НЗЧК}}$$

За счет применения коррекции режим НЗЧК становится частично зависимым от фактического положения ротора СЭД.

Предложенный алгоритм работы проверен на математических и физических моделях. По данному алгоритму работает устройство типа ШПТУ-ВИ ООО НПП «ЭКРА», применяемые для пуска высоковольтных СЭД агрегатов с большими статическими моментами нагрузки и инерционными массами.

На рис. 4 представлена осциллограмма пуска низковольтного СЭД типа ДС101-6, состыкованного с нагрузочным агрегатом. В качестве устройства ПЧЗ выступает устройство типа ШПТУ-ВИ, а в качестве нагрузочного агрегата — электропривод постоянного тока: электропривод постоянного тока типа 4ПФ160МВБ04 и преобразователь ТПР4-160/460Н-2-2УХЛ4.

Технические характеристики СЭД типа ДС101-6:  $P_{\text{ном}} = 75 \text{ кВт}$ ;  $n = 1000 \text{ об./мин.}$ ;  $I_{\text{ном. статор}} = 141 \text{ А}$ ;  $U_{\text{лин. ном. статор}} = 380 \text{ В}$ ;  $I_{\text{ном. ротор}} = 97,3 \text{ А}$ ;  $U_{\text{ном. ротор}} = 85 \text{ В}$ .

Технические характеристики электродвигателя постоянного тока типа 4ПФ160МВБ04:  $P_{\text{ном.}} = 30 \text{ кВт}$ ;  $I_{\text{ном.}} = 80,41 \text{ А}$ ;  $U_{\text{ном. ротор}} = 440 \text{ В}$ ; независимая обмотка возбуждения.

Все сигналы, показанные на рис. 3, представлены в относительных единицах:

$$\left. \begin{aligned} u_{ca}^m &= \frac{U_{ca}^m}{U_6}; u_{ca}^{\text{НЗЧК}} = \frac{U_{ca}^{\text{НЗЧК}}}{U_6}; \\ U_6 &= \sqrt{2} \cdot U_{\text{лин. ном. статор}}; \\ i_d &= \frac{I_d}{I_6}; I_6 = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном. статор}}; \\ \omega_{\text{выкл.}} &= \frac{\omega_U}{\omega_6}; \omega_6 = 2\pi \cdot f_6 = 100\pi. \end{aligned} \right\} (10)$$

Выражения для суммарных сигналов управления плечами анодных групп инвертора и катодных групп и имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{y+} &= 1 \cdot U_{Q1} + 2 \cdot U_{Q3} + 4 \cdot U_{Q5}; \\ U_{y-} &= 1 \cdot U_{Q4} + 2 \cdot U_{Q6} + 4 \cdot U_{Q2}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Перед началом эксперимента электропривод постоянного тока находится в режиме поддержания скорости близкой к нулю, при этом вал СЭД медленно проворачивается в противоположную заданной сторону со скоростью 0,1 об./мин. Таким образом, задается условие некорректного определения начального положения ротора.

Нагрузка на валу задается токоограничением выхода регулятора скорости и устанавливается на уровне 0,5 от значения номинального момента СЭД. Величина тока возбуждения СЭД в зоне низких скоростей задана на уровне  $1,4 \cdot I_{\text{ном. ротор}}$ .

Настройка УОМВР выполнена на длительность, составляющую 1% от длительности импульса.

БФНЗ настроен на работу с начальной частотой 0,5 Гц и темпом нарастания 0,5 Гц/с. Ускорение, формируемое БФНЗ, принято значительно меньше критического ускорения, при превышении которого ротор СЭД начинает отставать от задаваемых СУ положений, и пуск становится невозможным [2]. Таким образом, реализуется настройка СУ для работы в широком диапазоне изменения моментов нагрузки и инерции.

Так как скорость вычисляется из напряжения статора, то при первых коммутациях возможны её некорректные вычисления.

На рис. 4 вместо сигналов режима НЗЧК выведены суммарные сигналы импульсов управления плечами инверторов  $U_{y+}''$  и  $U_{y-}''$ , это вызвано тем, что в начале пуска они равны:

$$\left. \begin{aligned} U_{y+}^{\text{НЗЧК}} &= U_{y+}'' \\ U_{y-}^{\text{НЗЧК}} &= U_{y-}'' \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < t_{\text{ЗЗЧК}} \quad (12)$$

В момент времени  $t = t_{\text{ЗЗЧК}}$  СУ переходит в режим работы ЗЗЧК, а сигналы режима НЗЧК не формируются. За счет кратковременного прерывания тока выпрямителем, который переводится в инверторный режим работы, осуществляется принудительная коммутация тиристор инвертора до момента времени  $t = t_{\text{ЕК}}$ . В момент времени  $t = t_{\text{ЕК}}$  сигналы режима ЕК совпадают с суммарными сигналами  $U_{y+}''$  и  $U_{y-}''$ , а сигналы режима ЗЗЧК не формируются и удерживаются у значений, которые они принимали в момент перехода на ЕК.

Из-за малой величины индуктивности сглаживающих реакторов значительно влияние сетевого напряжения, которое заключается в колебаниях напряжения статора, достигающих величины  $0,6 \cdot U_6$  при нулевой скорости, что усложняет выделение из напряжения статора информации о противо-эдс СЭД.

Для лучшего понимания принципа работы СУ в зоне низких скоростей вместо трех синусоидальных сигналов с выхода ГТН и трех линейных напряжений статора на рис. 4 приведены только синусоидальный сигнал  $u_{ca}^{\text{НЗЧК}}$  и линейное напряжение статора  $u_{ca}^m$ . Из рис. 4 видно, что синусоидальный сигнал  $u_{ca}^{\text{НЗЧК}}$  имеет точки конечного ►



разрыва, причем разрыв происходит с временной задержкой от момента перехода сигналов коммутации  $U_{y+}^{334К}$  и  $U_{y-}^{334К}$  режима ЗЗЧК, который обусловлен текущая редакция УОМВР. Также из анализа рис.4 видно, что синусоидальный сигнал  $u_{ca}^{H34K}$  стремится повторить по огибающей линейное

напряжение статора  $u_{ca}^{H34K}$ . С учетом (12) в момент коррекции синусоидального сигнала выполняется равенство сигналов  $U_{y+}^{334К}$  и  $U_{y-}^{H34K}$  или равенство сигналов  $U_{y+}^{334К}$  и  $U_{y-}^{H34K}$ .

На рис. 5 представлена осциллограмма пуска высоковольтного СЭД типа 1ЕВ0Е155-60-4А турбокомпрессора типа

«Светлана» ОАО «Южно Балыкский ГПК». В качестве устройства ПЧЗ выступает устройство ШПТУ-ВИ-6-250. Действующее значение тока, потребляемого из питающей сети, в течение всего процесса пуска не превышает значение 0,7 номинального тока статора СЭД типа 1ЕВ0Е155-60-4А.

Технические характеристики СЭД 1ЕВ0Е155-60-4А производства фирмы «СКД PPAHA»:  $P_{2НОМ} = 3700$  кВт;  $n = 1500$  об./мин.;  $I_{НОМ, СТАТОР} = 435$  А;  $U_{ЛИН, НОМ. СТАТОР} = 6$  кВ;  $I_{НОМ, РОТОР} = 390$  А;  $U_{НОМ, РОТОР} = 55$  В.

Технические характеристики устройства ШПТУ-ВИ-6-250 производства ООО НПП «ЭКРА»: номинальное линейное напряжение – 6 кВ; номинальный рабочий ток – 250 А; пусковой ток в течение 90 с – не более 750 А.

Турбокомпрессор типа «Светлана» производства фирмы «СКД PPAHA» входит в состав пропановой холодильной установки типа «Иртыш». Турбокомпрессор с 3-х ступенчатым сжатием паров пропана выполняет функцию холодильного пропанового контура.

Все сигналы, показанные на рис. 5, представлены в относительных единицах согласно (10) – (11). Настройка УОМВР выполнена на длительность, составляющую 5 % от длительности импульса. БФНЗ настроен на работу с начальной частотой 1 Гц и темпом нарастания 1 Гц/с.

Анализ результатов моделирования и практического опыта работы на реальных объектах показал, что предложенный алгоритм управления бездатчиковым зависимым инвертором тока обеспечивает устойчивый частотный пуск высоковольтного синхронного электродвигателя с вращением в строго заданную сторону и отсутствием колебаний ротора, с пусковым током, не превышающим 0,8 номинального тока электродвигателя механизма, обладающего большим моментом инерции, или с пусковым током, не превышающим 1,2 номинального тока электродвигателя механизма, обладающего большим моментом нагрузки. ■

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов: Учеб.пособие для вузов: В 2т. Т1 и Т2 / А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев. – М.: Высш.шк., 2006 – 518 с.:ил.
2. Ильин В.И., Гинзбург С.М., Севастьянова В.Н. О пуске синхронной машины в режиме вентильного двигателя с имитатором положения ротора. – М.: Журнал «Электричество» №2, 1982 – 55-59 с.
3. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Калачиков П.Н., Емельянов А.П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение). Под. Редакцией Крутякова Е.А. – СПб.: «Силовые машины» «Электросила», 2004 – 252 с.
4. Шепелин В.Ф., Донской Н.В., Федоров Б.С. Пусковые режимы синхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска – М.: Журнал «Электротехника» №2, 2006 – 34 с.

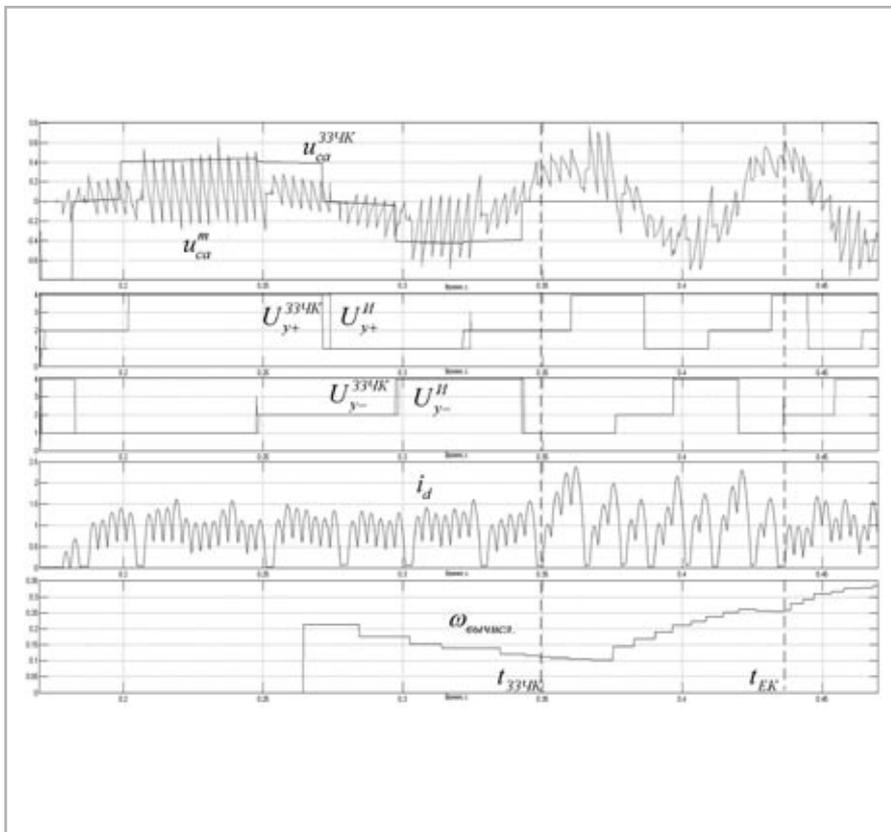


Рис. 4 Осциллограмма пуска низковольтного СЭД типа ДС101-6

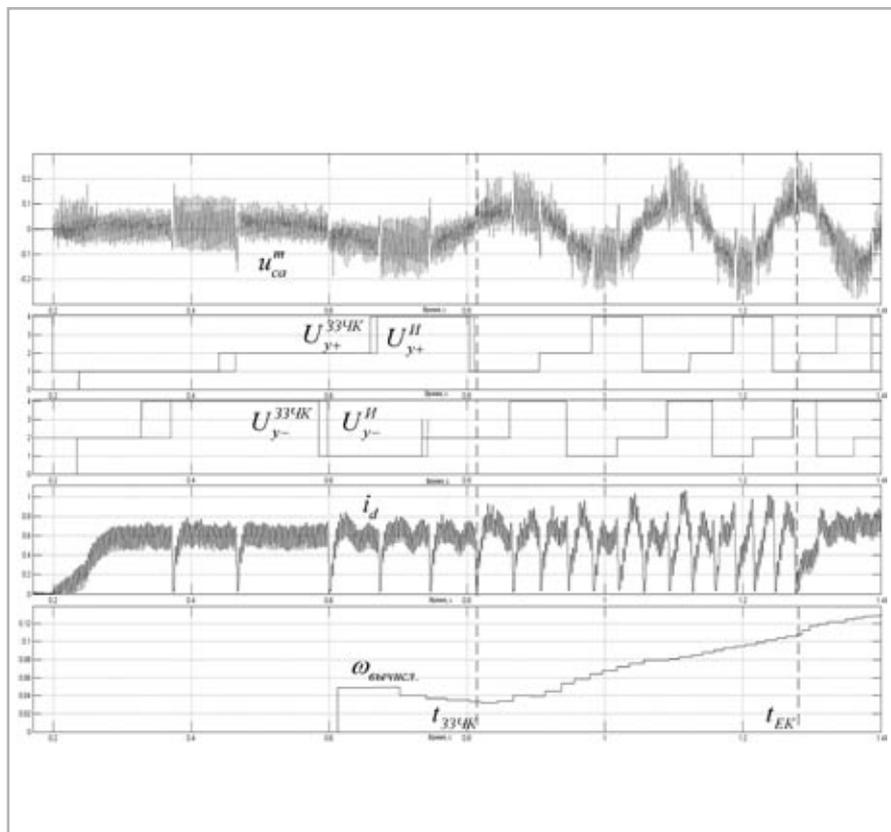


Рис. 5 Осциллограмма пуска высоковольтного СЭД мощностью 3700 кВт.