

УДК 621.313.32.019.3: 62-503.55: 621.313 +06

АЛГОРИТМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ НАСОСА ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ

Однокопылов Георгий Иванович¹,
OGIz@ya.ru

Розаев Иван Андреевич¹,
veazor@tpu.ru

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Нефтегазовая отрасль России сегодня одна из самых быстро развивающихся в стране. Высокие темпы развития предполагают внедрение новых технологий и значительную модернизацию технологических комплексов, входящих в состав производственной базы. В частности, исполнительных двигателей насосов добычи и транспортировки ископаемого топлива. Надёжное и бесперебойное функционирование двигателя насоса является конкурентным преимуществом. Для снижения вероятных простоев оборудования и недоотпуска нефти предлагается использовать современный вентильно-индукторный электродвигатель в качестве исполнительного двигателя насоса добычи нефти. Существующие разработки показывают конкурентные преимущества этого типа электродвигателя при доработке системы управления и применении алгоритмов отказоустойчивого управления. Повысить отказоустойчивость и расширить области применения вентильно-индукторного электродвигателя позволяет использование бездатчикового управления. На сегодняшний день в технической литературе данная тематика проработана недостаточно глубоко, а математическая и имитационная модели бездатчикового управления вентильно-индукторным электроприводом в аварийном неполнофазном режиме работы ранее рассмотрены не были.

Цель: разработка алгоритмов отказоустойчивого бездатчикового управления исполнительным вентильно-индукторным электродвигателем в неполнофазных режимах работы; обеспечение корректности переключения структуры управления при обрыве фазы; повышение отказоустойчивости вентильно-индукторного электродвигателя насоса в аварийных режимах работы путем подключения алгоритмов отказоустойчивого управления при переключении структуры управления.

Объект: четырехфазный вентильно-индукторный электродвигатель насоса добычи или транспортировки нефти в аварийных неполнофазных режимах работы.

Методы: математическое и имитационное моделирование, программирование в среде Matlab Simulink.

Результаты. Разработаны математическая и имитационная модели бездатчикового отказоустойчивого четырехфазного вентильно-индукторного электропривода в аварийном режиме работы. Получен алгоритм бездатчикового отказоустойчивого управления насосом с вентильно-индукторным электродвигателем в аварийном режиме работы. Получены характеристики насоса добычи нефти в неполнофазном режиме работы исполнительного вентильно-индукторного электродвигателя с применением алгоритма отказоустойчивого управления.

Ключевые слова:

Вентильно-индукторный электродвигатель, обрыв фазы электродвигателя, отказоустойчивый электропривод, алгоритм отказоустойчивого управления, бездатчиковое управление.

Введение

На сегодняшний день нефтяная отрасль является основой развития Российского энергетического сектора. Очевидно, что необходимо обеспечивать полное функционирование производства на месторождениях и избегать простоев и недоотпуска нефти [1]. Одним из основных факторов, влияющих на непрерывность процесса добычи, является эффективное использование электрооборудования на участках цикла добычи [2]. Необходимо повышение отказоустойчивости исполнительных двигателей насосных агрегатов с целью предотвращения аварийных отключений насоса добычи нефти. Предложено использование вентильно-индукторного электродвигателя (ВИД) в качестве исполнительного двигателя насоса добычи или транспортировки нефти, это позволяет продолжить работу насоса после обрыва фазы статорной обмотки исполнительного двигателя [3, 4]. Существует ряд исследований, касающихся повышения отказоустойчивости [5] ВИД, однако они преимущественно относятся к модернизации конструктивных особенностей ВИД, а не алгоритмического управления [6]. Следует

отметить, что преимущества ВИД и некоторые существующие варианты повышения отказоустойчивости приведены в работах [7–10]. Аппаратное применение бездатчикового управления в погружных насосах с вентильным двигателем изучено и широко используется, например, группой компаний «Новомет» [3, 4, 6]. Существующие разработки показывают конкурентные преимущества этого типа электродвигателя, однако не рассматривают работу ВИД в аварийных неполнофазных режимах работы [4]. В работе показано, что при доработке системы управления и применении алгоритма отказоустойчивого управления можно значительно повысить отказоустойчивость и применимость вентильно-индукторного электродвигателя за счет использования исполнения ВИД без датчика положения ротора, так как для погружного насоса добычи нефти блок телеметрии способен передавать из скважины только медленно меняющиеся сигналы технологического процесса [11, 12]. В реальных электромеханических комплексах насосных агрегатов положение ротора электродвигателя определяется путем математических вычислений на основе

мгновенных значений токов и напряжений [13, 14]. Существующие системы с наблюдателями состояния не позволяют адекватно при помощи математического аппарата рассчитывать положение ротора в аварийном режиме, так как в структуры системы управления не заложено возникающее при отказе фазы смещение векторов потока, соответственно происходит ошибка расчета и модель перестает функционировать [15–17]. В отличие от имеющихся ранее рассмотренных разработок [4, 18–23], рассмотренное в статье решение позволяет реализовать работу исполнительного четырехфазного ВИД электроцентробежного насоса (ЭЦН) с бездатчиковым управлением в аварийном режиме работы, за счет переключения структуры управления со смещением векторов в соответствии с оставшимися в работе фазами.

Математическое и имитационное моделирование насоса с бездатчиковым ВИД

За основу была принята математическая модель насоса с ВИД, рассмотренная в [4]. Матрица $[M_o]$ отказов для четырехфазного ВИД примет вид:

$$[M_o] = \begin{bmatrix} b_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где единичному состоянию битов отказов, b_A, b_B, b_C, b_D будет соответствовать нормальный полнофазный режим работы, а нулевому – неполнофазный режим работы при обрыве соответствующей фазы A, B, C, D обмотки статора [4].

Бездатчиковое векторное управление ВИД осуществляет система управления, которая анализирует изменения магнитного потока в фазах двигателя и определяет необходимые моменты коммутации обмоток ВИД, производит регулирование тока в фазных обмотках ВИД, рассчитывает текущую скорость вращения ротора. Величина потокосцепления на полюсах ВИД изменяется во времени, но ее направление соответствует оси поля статора фазы [24–26]. В аварийном режиме ВИД при обрыве фазы необходимо перенаправить векторы магнитного потока для создания общего магнитного поля, чтобы избежать ошибки

при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз как при наличии датчика положения ротора [27, 28]. Чтобы вывести общий вектор потока статора, вектора потоков фаз преобразуются в стационарной ортогональной двухосной системе координат $d-q$. На рис. 1 приведены векторные диаграммы потока Φ в осях $d-q$ для разных конструкций пяти (10/8), четырех (8/6), трех (6/4) фазного ВИД.

Магнитные потоки будут суммироваться в магнитной системе ВИД с разными амплитудами и приводить к возникновению суммарного магнитного потока, фаза которого зависит от углового положения ротора ВИД [29, 30]. Изучение существующих бездатчиковых алгоритмов управления электроприводом показало, что данные алгоритмы не позволяют производить адекватное управление в аварийном неполнофазном режиме работы [31–36]. Разработан алгоритм (2), позволяющий изменять углы векторов потока в соответствии с количеством оставшихся в работе фаз в аварийном режиме. Необходимые углы векторов потока в фазах для разных конструкций, в зависимости от числа оставшихся в работе фаз, приведены в табл. 1.

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{\Phi_d} &= \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi_j} \cdot \cos(\sigma_j); \\ \overline{\Phi_q} &= \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi_j} \cdot \sin(\sigma_j); \\ X &= \sum_{j=1}^N b_j; \\ \overline{\Phi_{\text{общ}}} &= \sqrt{\overline{\Phi_d}^2 + \overline{\Phi_q}^2}; \\ \sigma &= \arctan\left(\frac{\overline{\Phi_q}}{\overline{\Phi_d}}\right), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где b_j – бит отказа соответствующей фазы; N – число фаз ВИД; X – счетчик состояния ВИД; $\overline{\Phi_d}$ – вектор потока соответствующей фазы; Φ_d и Φ_q – поперечная и продольная составляющая результирующего вектора суммарного потока в осях $d-q$; σ_j – угол вектора соответствующей фазы (табл. 1); σ – угол вектора $\Phi_{\text{общ}}$.

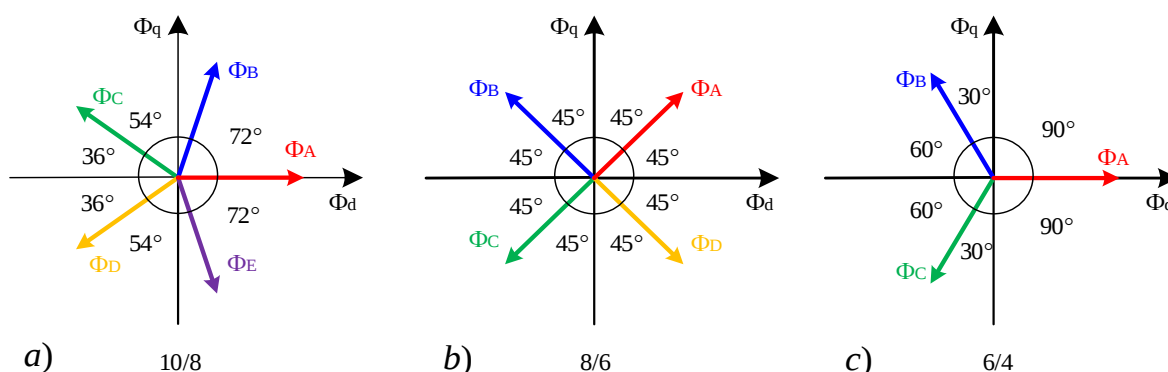


Рис. 1. Векторные диаграммы потока Φ в осях $d-q$ для разных конструкций 5-ти (а), 4-х (б), 3-х (с) фазного ВИД
Fig. 1. Flux Φ vector diagrams in $d-q$ axes for different constructions 5th (a), 4th (b), 3rd (c) phases SRM

Рассмотрим работу четырехфазного ВИД топологии 8/6 в аварийном режиме с реализацией алгоритма переключения (2). Формирование векторов потока в нормальном рабочем режиме работы обеспечивает поочередную коммутацию полюсов фаз электродвигателя с рабочим углом $\pi/4$ (3). При этом $X=4$, ($b_A=1$, $b_B=1$, $b_C=1$, $b_D=1$). Принято, что вектор фазы А ориентирован в одном направлении с осью d .

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi_A \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_D \cos\left(\frac{\pi}{4}\right); \\ \Phi_q = \Phi_A \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_D \sin\left(\frac{\pi}{4}\right). \end{cases} \quad (3)$$

В аварийном режиме при отказе одной фазы необходимо изменить углы векторов потока на рабочий угол $\pi/3$ в соответствии с табл. 3, чтобы избежать ошибки при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз (4). При этом $X=3$, ($b_A=1$, $b_B=1$, $b_C=1$, $b_D=0$) тогда:

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi_A - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{3}\right); \\ \Phi_q = \Phi_A + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (4)$$

В нормальном режиме работы формируется четыре матрицы коммутации полюсов фаз, по аналогии с ранее рассмотренными матрицами отказов (1). В аварийном режиме при отказе одной фазы двигатель теряет два полюса и переходит в трехфазный режим с тремя матрицами коммутации фаз.

В общем виде математическая модель насоса на базе ВИД с бездатчиковым управлением примет вид (5).

$$\begin{cases} \overline{\Phi_d} = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi_j} \cdot \cos(\sigma_j); \\ \overline{\Phi_q} = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi_j} \cdot \sin(\sigma_j); \\ X = \sum_{j=1}^N b_j; \\ \overline{\Phi_{\text{обц}}} = \sqrt{\overline{\Phi_d}^2 + \overline{\Phi_q}^2}; \\ \sigma = \arctan(\overline{\Phi_d} / \overline{\Phi_q}); \\ \Psi_j = \sum_j^F \Phi_j; \\ K_{\text{от}} = (\partial \Psi_j(i_j, \theta_j)) / \partial \sigma; \\ L_{dj} = (\partial \Psi_j(i_j, \theta_j)) / \partial i_j; \\ [R_M] = ([1] + k_{\omega} [M_0]) \cdot [R]; \\ d[i] / dt = [L_d]^{-1} \{ [U] - [R_M][i] - \omega [K_{\omega}] \}; \\ M = M_A(i_A, \theta_j) + M_B(i_B, \theta_j) + M_C(i_C, \theta_j) + M_D(i_D, \theta_j); \\ M_c(\omega) = M + (M_{c \max} - \Delta M_{c \text{тр}} - \Delta M_{c \text{ж}}) \cdot (\omega / \omega_n)^x; \\ d\omega / dt = (p / J)(M - M_c); \\ \theta_j = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\ Z = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) / (G_0 + j\omega C_0)}; \\ p / (pg) - H_{\text{н}} \cdot (\omega / \omega_n)^x + S_f \cdot Q^2 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

Таблица 1. Углы векторов потока для разных конструкций

Table 1. Flux vectors angles for different constructions

X	σ_j , град.				
	A	B	C	D	E
5	0	72	36	36	72
4	45	45	45	45	–
3	0	60	60	–	–
2	0	90	–	–	–

где $[i]$ – матрица токов фаз статора ВИД; $[U]$ – матрица напряжений фаз ВИД; $[R]$ – матрица сопротивлений фаз ВИД; L_{dj} – дифференциальная индуктивность j -й фазой; $[L_d]$ – прямая матрица дифференциальных индуктивностей фаз ВИД в функции фазных токов и текущего расчетного положения ротора; Ψ_j – потокосцепление j -й фазы; F – число витков обмотки; $K_{\text{от}}$ – коэффициент противо-ЭДС j -й фазы; $[K_{\omega}]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС фаз ВИД в функции фазных токов и расчетного положения ротора; θ_j – угол поворота ротора, формируемый j -й фазой; k_{ω} – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора; J – суммарный момент инерции электропривода; $M_A(i_A, \theta_j)$, $M_B(i_B, \theta_j)$, $M_C(i_C, \theta_j)$, $M_D(i_D, \theta_j)$ – моменты, развиваемые фазами А, В, С, D; p – число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения ротора; M_c – момент сопротивления; ω_n – номинальное значение частоты вращения вала насоса; H_n – уровень напора на выходе насоса; $H_{\text{н}}$ – принятое «фиктивное» значение напора насоса на номинальной частоте вращения; H_z – заданное значение напора; S_f – принятое значение гидравлического сопротивления насоса; ρ – значение плотности жидкости, проходящей через насос; g – ускорение свободного падения; Z – волновое сопротивление кабеля; G_0 – диэлектрические потери; L_0 – индуктивность единицы длины кабельной линии питания (КЛ); R_0 – продольное активное сопротивление КЛ с распределенными параметрами; C_0 – емкость единицы длины КЛ. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным $\Delta M_{c \text{тр}}$, момент сопротивления жидкости $\Delta M_{c \text{ж}}$.

Здесь в системе уравнений (5) строки с 1 по 5 – это уравнения, составляющие алгоритм переключения структуры управления при бездатчиковом управлении ВИД (2), строка 6 уравнения – формирование потокосцепления. Строки 7, 8 – ранее разработанные уравнения формирования матрицы активных сопротивлений и токов, подробно рассмотренные в ранее опубликованной статье [4]. Строки 9, 10 – уравнения формирования момента и нагрузки, доработанные под четырехфазный ВИД. Строка 11 – основное уравнение движения электропривода, строка 12 – расчет угла положения на основании расчетной частоты вращения, строка 13 – уравнение, учитывающее волновое сопротивление КЛ, строка 14 – уравнение статической модели центробежного насоса [4].

В дополнение к рассмотренному выше алгоритму бездатчикового управления (4), целесообразно применить алгоритм отказоустойчивого управления четы-

рехфазным ВИД с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз [4]. Доказано, что применение данного алгоритма (6) позволяет при отказе типа «обрыв фазы» уменьшить падение активной мощности ВИД за счет увеличения амплитудных значений токов в оставшихся функционирующих фазах.

Коэффициент k_d управления обеспечивает скачкообразное увеличение амплитуды фазных токов в аварийном режиме, здесь

$$k_d = \left(b_j + \overline{b_j} \cdot \frac{3}{2} \right),$$

для компенсации активной мощности отказавшей фазы двигателя. При отсутствии отказа в j -й фазе: $b_j=1$, $b_j=0$, $k_d=1$; при наличии отказа в j -й фазе $b_j=0$, $b_j=1$, $k_d=3/2$.

$$\begin{cases} I_A = I_{\omega} b_A \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \theta_A) - \theta) \right] / 2; \\ I_B = I_{\omega} b_B \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \theta_B) - \theta) \right] / 2; \\ I_C = I_{\omega} b_C \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \theta_C) - \theta) \right] / 2; \\ I_D = I_{\omega} b_D \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_D, \theta_D) - \theta) \right] / 2. \end{cases} \quad (6)$$

В общем виде блок-схема совместной работы алгоритмов отказоустойчивого бездатчикового управления (4) насосом добычи нефти с ВИД и алгоритма компенсации токов фаз (6) примет вид, как показано на рис. 2.

Функциональная блок-схема рассматриваемого насоса добычи нефти с ВИД приведена на рис. 3.

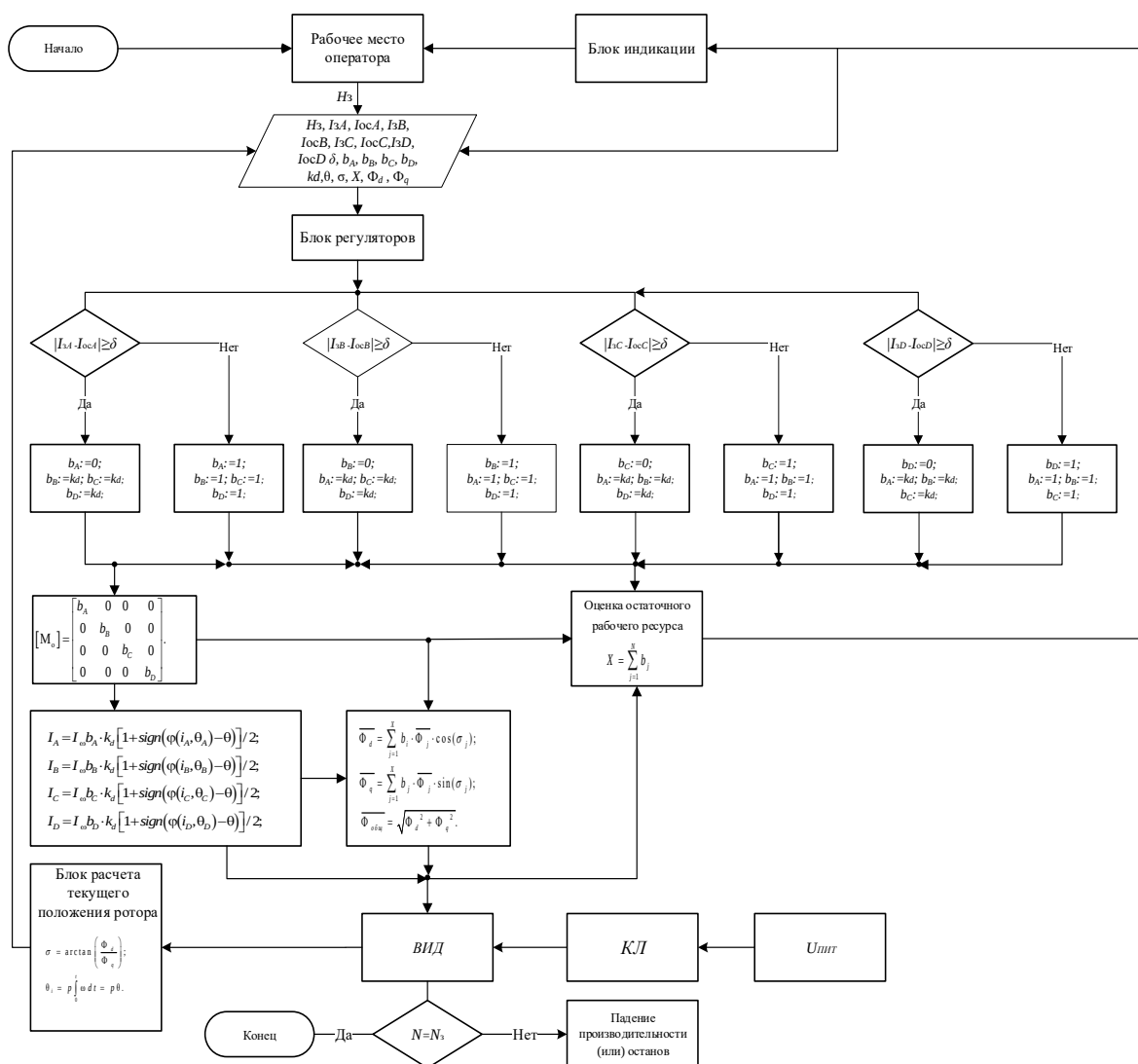


Рис. 2. Блок-схема совместной работы алгоритма отказоустойчивого бездатчикового управления насосом добычи нефти с ВИД и алгоритма компенсации токов фаз

Fig. 2. Block diagram of joint operation of fault-tolerant sensorless control algorithm of an oil pump with SRM and the phase current compensation algorithm

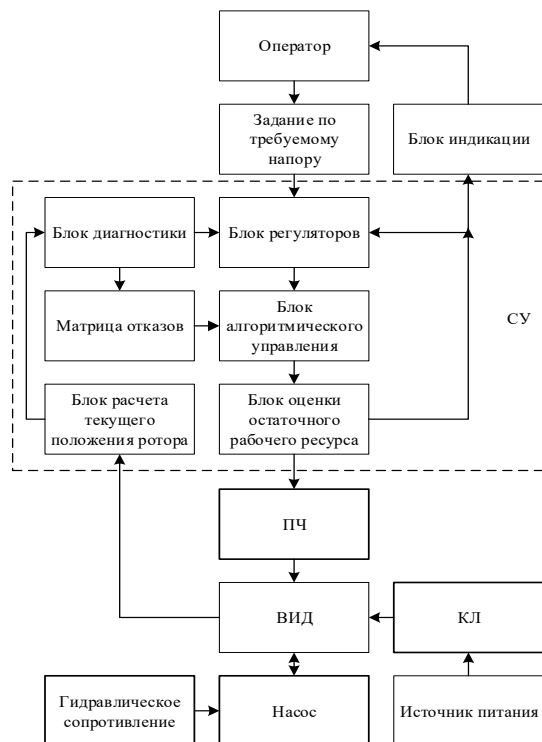


Рис. 3. Функциональная блок-схема рассматриваемого насоса добычи нефти с ВИД

Fig. 3. Functional block diagram of the considered oil pump with a SRM

Основные принципы построения моделей блоков и систем вентильно-индукторного электропривода в среде имитационного моделирования MatLab Simulink ранее рассмотрены в ряде работ [37–40]. Структурная схема имитационной модели насоса добычи нефти с вентильно-индукторным электродвигателем в качестве исполнительного с отказоустойчивым бездатчиковым векторным управлением показана на рис. 4.

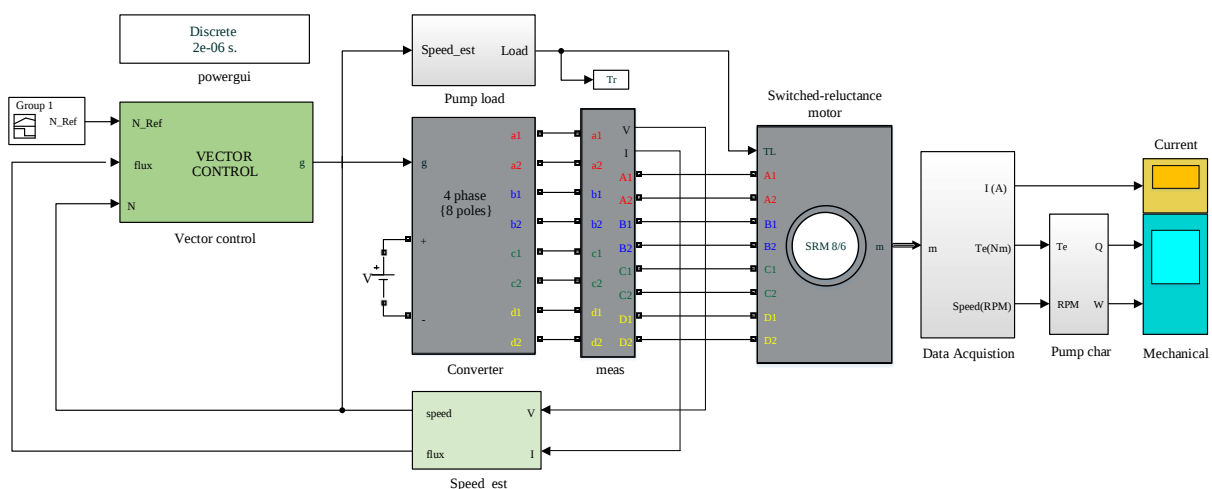


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели насоса добычи нефти с вентильно-индукторным электродвигателем с отказоустойчивым бездатчиковым управлением

Fig. 4. Block diagram of a simulation model of an oil pump with a switched-reluctance motor with fault-tolerant sensorless control

Блок анализа задания и векторного управления и формирования сигналов на преобразователь частоты показан на рис. 5.

При обрыве фазы значение входного сигнала «sign» изменится с 0 на 1, что приведет к переключению структуры системы управления с 4-х фазного ВИД топологии 8/6 на 3-х фазный с топологией 6/4. Это позволяет изменить матрицы коммутации ключей по секторам с учетом оставшегося количества рабочих полюсов фаз. Блок, формирующий вектора потока, реализующий уравнения (3) и (4), показан на рис. 6.

Здесь сигнал «sign» аналогично предназначен для переключения структуры бездатчикового управления в соответствии с табл. 1 и рис. 1.

Описание устройства блоков преобразователя частоты (ПЧ), кабельной линии (КЛ), блока регуляторов, блока возмущающего воздействия и блока ЭЦН с ВИД рассмотрены в ранее опубликованных работах [4, 18–20].

Результаты моделирования

Ниже приведены зависимости частоты вращения (ω , фиолетовая кривая), объемного расхода жидкости (Q , голубая кривая) и токов (i_m , красная кривая для фазы A, синяя для фазы B, зеленая для фазы C, желтая для фазы D) для случая аварийного режима штатной четырехфазной модели без переключения структуры бездатчикового управления (рис. 8), в случае работы с разработанным алгоритмом бездатчикового управления (4) в аварийном режиме работы (рис. 9), при работе с алгоритмом бездатчикового управления (4) и алгоритма компенсации токов (6), где m – число функционирующих фаз двигателя (рис. 10). На графиках объемный расход (Q) показан пульсирующей кривой, это обусловлено особенностями работы ВИД как машины с пульсацией момента.

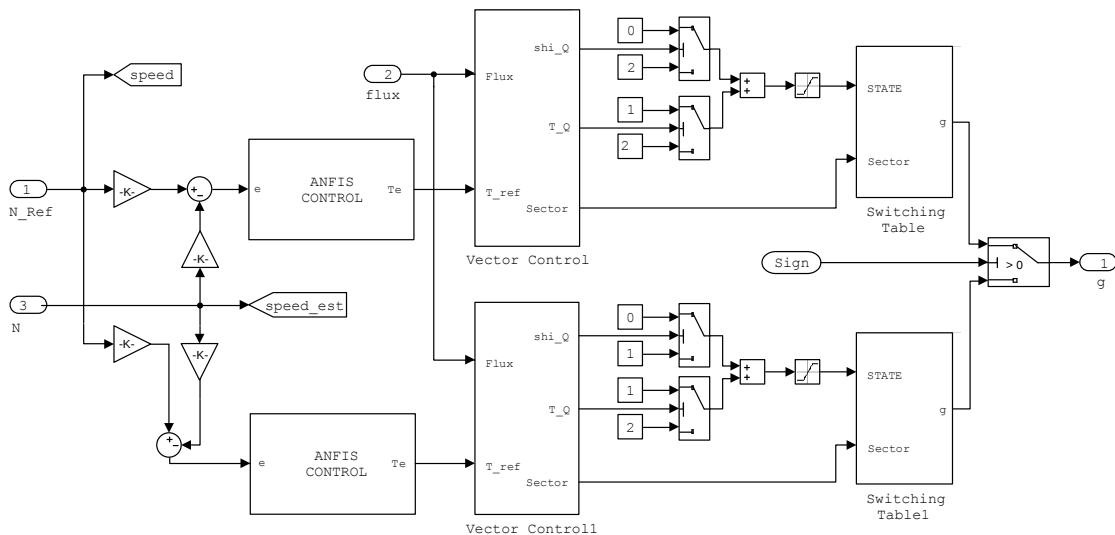


Рис. 5. Структурная схема имитационной модели блока «Векторное управление»

Fig. 5. Structural scheme of simulation model block «Vector control»

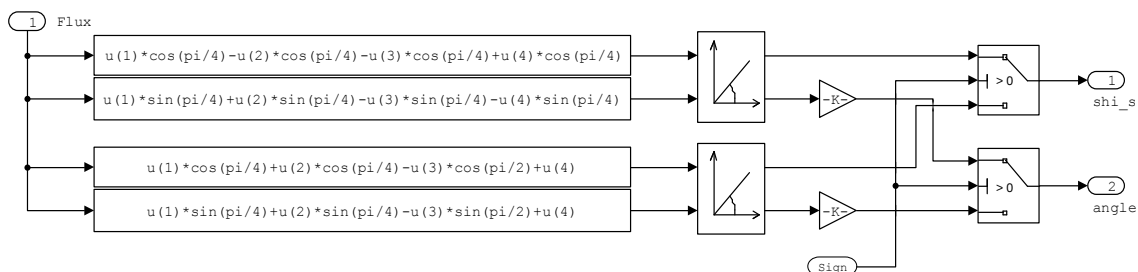


Рис. 6. Структурная схема имитационной модели блока, формирующего вектора потока

Fig. 6. Structural scheme of simulation model block of flow vectors formation

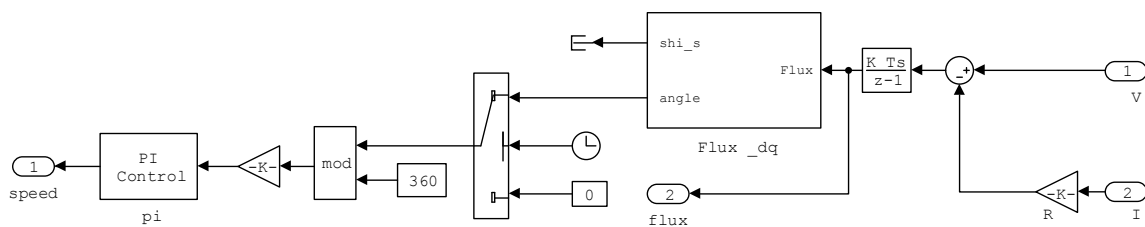


Рис. 7. Структурная схема имитационной модели блока, рассчитывающего текущую скорость и положение ротора

Puc. 7. Structural scheme of simulation model block of rotor speed and position calculation

Показано, что при работе без переключения структуры управления (рис. 8) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электропривод насоса прекращает функционировать и реагировать на управление, токи в отдельных оставшихся подключенных к питанию фазам возрастают в 5 раз от номинального уровня. Время достижения первого максимума при пуске $t_1=0,19$ с. Время пуска до установившегося значения $t_2=0,265$ с.

При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4) (рис. 9) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с) электродвигатель насоса продолжает функционировать с потерей мощности до уровня 0,62 от номинального значения. При этом значения токов в оставшихся в работе фазах на время переходного процесса возрастают на 25 %, не превышая пусковых значений токов. Время дости-

жения первого максимума при пуске $t_1=0,19$ с. Время пуска до установившегося значения $t_2=0,265$ с. Время переходного процесса при переключении структуры управления $t_3=0,2$ с.

При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4) совместно с алгоритмом компенсации токов в оставшихся функционирующих фазах (6) (рис. 10) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с) электродвигатель насоса продолжает свою работу в трехфазном режиме. На участке (0,5–0,7 с) показана возможность работы с алгоритмом компенсации токов в оставшихся в работе фазах на уровне мощности 0,89 от заданного номинального уровня, значение токов в оставшихся в работе фазах повышается на $k_d=1,5$. Время переходного процесса при переключении структуры управления на работу с алгоритмом компенсации токов

$t_3=0,09$ с. Как видно из графика (рис. 10), работа с алгоритмом компенсации позволяет сохранить близкую к требуемой мощность, но значительно увеличивает токи в оставшихся в работе фазах, что может привести к перегреву и выходу из строя электродвигателя. Поэтому рассмотренный режим рекомендуется использовать как кратковременный в случае необходимости на непродолжительное время поднять крутящий момент и мощность насоса с дальнейшим переходом на трехфазный режим с уровнем 0,62 от но-

минального, как показано на рис. 8. На участке графика (0,7–0,9 с) показан переход к трехфазному режиму работы без алгоритма компенсации токов, установившийся режим показан на графике в интервале от 0,85 до 0,9. Время достижения первого максимума при пуске $t_1=0,185$ с. Время пуска до установившегося значения $t_2=0,265$ с. Время обратного перехода на структуру с бездатчиковым алгоритмом управления $t_4=0,15$ с.

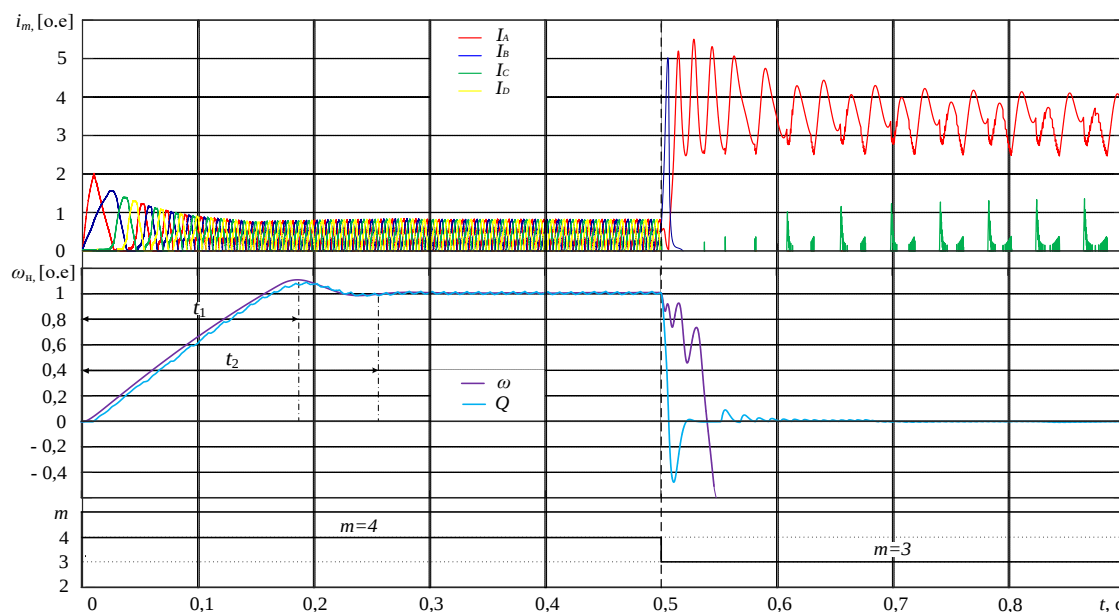


Рис. 8. Зависимость токов фаз (i_m), угловой частоты вращения (ω), объемного расхода жидкости (Q) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД без переключения структуры управления

Fig. 8. Phase current (i_m), speed (ω) and flow (Q) curves in relative units during emergency operation mode of 4-phase SRM without switching the control structure

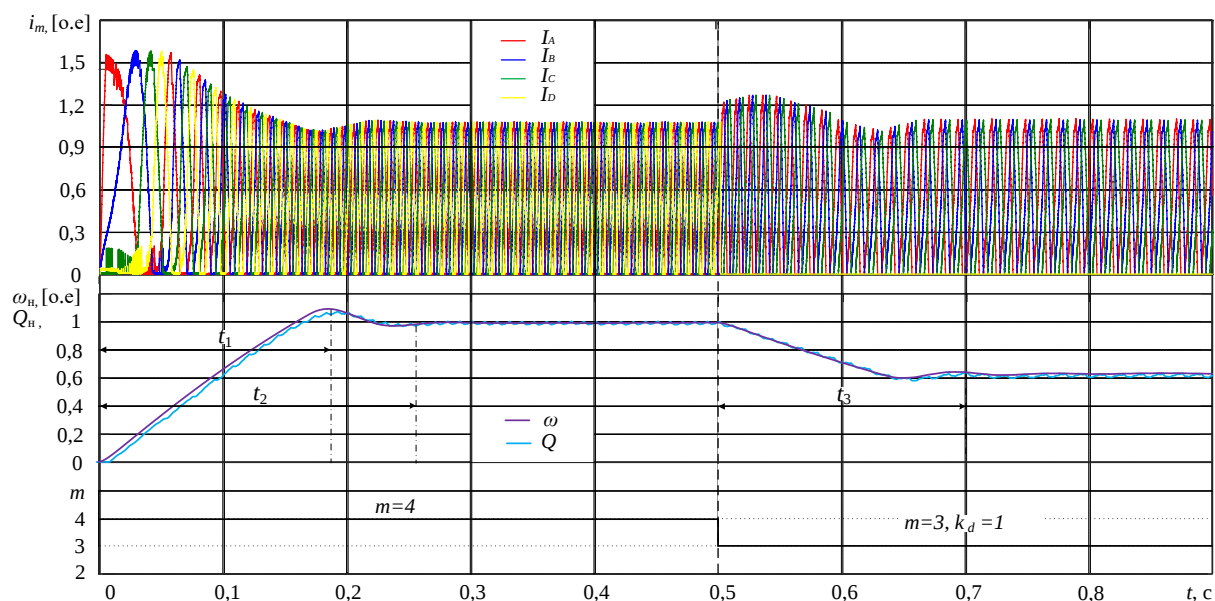


Рис. 9. Зависимость токов фаз (i_m), угловой частоты вращения (ω), объемного расхода жидкости (Q) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом бездатчикового управления

Fig. 9. Phase current (i_m), speed (ω) and flow (Q) curves in relative units during emergency operation mode of 4-phase SRM under switching control structure to sensorless control algorithm

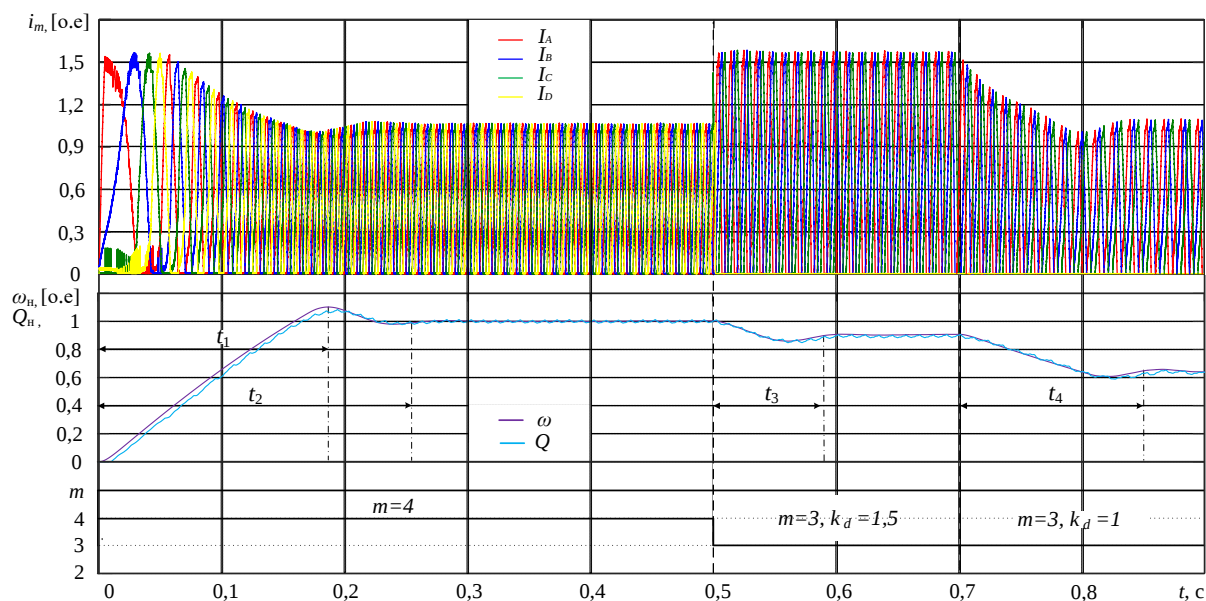


Рис. 10. Зависимость токов фаз (i_m), угловой частоты вращения (ω), объемного расхода жидкости (Q) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом бездатчикового управления и алгоритмом компенсации токов

Fig. 10. Phase current (i_m), speed (ω) and flow (Q) curves in relative units during emergency operation mode of 4-phase SRM under using switching control structure both to sensorless control algorithm and to the phase current compensation algorithm

Выводы

1. Разработаны математическая и имитационная модели отказоустойчивого бездатчикового четырехфазного вентильно-индукторного электропривода насосного агрегата в аварийном режиме работы.
2. Показано, что при использовании алгоритма бездатчикового отказоустойчивого управления насосом с вентильно-индукторным электродвигателем в аварийном режиме работы после отказа типа «обрыв фазы» происходит переключение структуры управления и электродвигатель продолжает функционировать с потерей мощности 38 % от номинального заданного уровня частоты вращения вала электродвигателя насоса. Данный алгоритм

допускает долговременную эксплуатацию насосного агрегата на оставшихся в работе фазах без риска перегрева обмоток электродвигателя.

3. При совместном использовании алгоритма бездатчикового управления и алгоритма компенсации момента за счет увеличения амплитуды фазных токов после отказа типа «обрыв фазы» электродвигателя работоспособность можно временно восстановить до уровня 89 % от номинального заданного значения частоты вращения вала электродвигателя с минимальным снижением требуемого уровня объемного расхода жидкости, с дальнейшим переходом на длительный режим 62 % уровня от номинального без использования алгоритма компенсации токов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларченко Л.В. Нефтегазовая отрасль России: современное состояние и направления развития в условиях неопределенности // Общество. Среда. Развитие. – 2019. – № 1. – С. 9–13.
2. Проблемы анализа технического состояния современных приводов компрессорных установок магистральных газопроводов / П.С. Кунина, Е.И. Величко, М.С. Степанов, А.В. Музыкантова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 3. – С. 56–58.
3. Павлов Д.О., Кузнецов Е.М. Бездатчиковое определение скорости в электроприводе установок электроцентробежных насосов // Актуальные вопросы энергетики. – Омск: Изд-во Омского государственного технического университета, 2016. – С. 147–153.
4. Однокопылов Г.И., Букреев В.Г., Розаев И.А. Исследование отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 69–81.
5. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Annual reviews in control. – 2008. – V. 32. – № 2. – P. 229–252.

6. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: Сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 23–33.
7. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. Industrial electronics series. – USA: CRC Press, 2010. – 398 p.
8. Sheth N.K., Sekharbabu A.R.C., Rajagopal K.R. Effects of interturn fault in phase winding on the performance of multi-phase doubly salient motors // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2006. – V. 304. – № 1. – P. 207–209.
9. Александровский С.В., Петренко Ю.Н. Разработка математической и имитационной модели вентильно-индукторного двигателя // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 2. – С. 15–22.
10. Gerling D., Schramm A. Evaluation and comparison of fault tolerant switched reluctance machines for a specific application // Proc. of the 9 Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE). – Marbella, Spain, 2005. – 5 p.
11. Котин Д.А., Панкратов В.В. Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в асинхронизированном синхронном электроприводе // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 4. – С. 46–51.

12. Нос О.В., Волков В.Ю., Клан В.А. Векторное управление электроприводом переменного тока с многоуровневым преобразователем частоты на базе n-мостов // Электротехника. – 2019. – Т. 90. – № 4. – С. 304–309.
13. Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. Topology optimization of Switched-reluctance motors for the desired torque profile. Structural and multidisciplinary optimization. – 2010. – V. 42. – № 5. – P. 783–796.
14. Нгуен Куанг Кхоа. Исследование электромеханического комплекса: вентильно-индукторный электропривод – центробежный насос // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 4. – С. 55–64.
15. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, Sandor Halasz // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
16. Nesimi Ertugrul, Adrian D. Cheok. Indirect angle estimation in switched reluctance motor drives using fuzzy logic based motor model // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Iss. 15. – № 6. – P. 1029–1044.
17. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J. Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques. – NY: Springer, 2003. – 282 p.
18. Odnokopylov G.I., Rozayev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – № 1. – P. 1–7.
19. Odnokopylov G.I., Rozayev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proc. – Omsk, May 21–23, 2015. – P. 1–6.
20. Odnokopylov G.I., Rozayev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST): Proc. – Novosibirsk, June 1–3, 2016. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016. – V. 2. – P. 140–144.
21. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 85–95.
22. Однокопылов Г.И., Шевчук В.А., Дементьев Ю.Н. Применение системного анализа для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 131–140.
23. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698. – P. 24–29.
24. Sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine / C.J. Bateman, B.C. Mecrow, P.P. Acarnley, A.C. Clothier, N.D. Tufnell // IEEE transactions on industry applications. – 2010. – V. 46. – № 6. – P. 2329–2337.
25. Torque-ripple minimization for switched reluctance motor based on torque sharing function by fuzzy variable angle strategy / Z. Liu, J. Wang, X. Song, J. Tang, Y. Yang // ICIC express letters. – 2017. – V. 11. – № 1. – P. 161–168.
26. Чавылалов М.В. Бездатчиковое определение положения ротора в системе управления вентильно-индукторного электропривода: дис. ... канд. тех. наук. – Ростов-на-Дону, 2013. – 115 с.
27. Multiphysics NVH modeling: simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle / F.L.M. dos Santos, J. Anthonis, F. Naclerio, H. van Der Auweraer, J.J.C. Gyselinck, L.C.S. Góes // IEEE transactions on industrial electronics. – 2014. – V. 61. – № 1. – P. 469–476.
28. Diab A.A.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Speed control of sensorless induction motor drive based on model predictive control // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Novosibirsk, 2013. – P. 269–274.
29. Petrushin A., Tchavychalov M. Improving the accuracy of switched reluctance motor sensorless rotor position estimation // Journal of engineering and applied sciences. – 2015. – V. 10. – № 4. – P. 80–84.
30. Polyakov V., Plotnikov I., Postnikov N. Three-loop control system of energy storage device in the frequency-controlled electric drive // 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – Moscow, 2019. – P. 1–5.
31. Вдовин В.В., Котин Д.А., Панкратов В.В. Адаптивный алгоритм вычисления координат для бездатчикового векторного управления машинами двойного питания // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 23–27.
32. Фролов В.Я., Жилиготов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 92–97.
33. Adaptive state observers for sensorless control of switched reluctance motors / R. Ortega, A. Sarr, I. Bahri, D. Diallo, A. Bobtsov // International journal of robust and nonlinear control. – 2019. – V. 29. – № 4. – P. 990–1006.
34. Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control / N.D. Irimia, A. Simon, L. Livadaru, S. Vlasceanu, O. Dabija, A.M. Mihai // Buletinul AGIR. – Iasi, Romania: Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2011. – P. 129–134.
35. Нугаев И.Ф., Искужин Р.В. Комплекс математических моделей для решения задач синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – № 7. – С. 36–44.
36. Senthil Murugan L., Maruthupandi P. Sensorless speed control of 6/4-pole switched reluctance motor with ANFIS and fuzzy-PID-based hybrid observer // Electrical Engineering. – 2020. DOI: 10.1007/s00202-019-00915-5
37. Wajdi Z., Jalel K., Habib R. Comparative design and modeling study of single sided linear planner switched reluctance motor // WSEAS transactions on circuits and systems. – 2014. – V. 13. – P. 37–46.
38. Бычков М.Г., Красовский А.Б. Имитационная модель вентильно-индукторного электропривода при бездатчиковом варианте управления // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № S2. – С. 5–17.
39. Ganji B., Askari M.H. Analysis and modeling of different topologies for linear switched reluctance motor using finite element method // AEJ – Alexandria engineering journal. – 2016. – V. 55. – № 3. – P. 2531–2538.
40. Nos O.V., Starostina L.V., Radel U. The synchronous switching of motor power supply from frequency converter to grid for an ac drives with field-oriented vector control // 18th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Novosibirsk, 2017. – P. 511–515.

Поступила 05.05.2020 г.

Информация об авторах

Однокопылов Г.И., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Розаев И.А., ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 621.313.32.019.3: 62-503.55: 621.313 +06

ALGORITHMS OF FAULT-TOLERANT SENSORLESS VECTOR CONTROL OF SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR IN ELECTRICAL OIL PUMP

Georgy I. Odnokopylov¹,
OGIz@yandex.ru

Ivan A. Rozaev¹,
Veazor@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. Russian oil and gas industry today is one of the fastest growing in the country. High rates of development suggest introduction of new technologies and significant modernization of technological complexes that make up the production base. Particularly it is necessary to modify the executive motors of fossil fuel extraction and transportation pumps. Reliable and uninterrupted operation of the pump motor is a competitive advantage. To reduce the probable equipment downtime and oil shortage it is considered to use modern switched-reluctance motor as an actuator for oil production pump. Existing developments show the competitive advantages of this type of electric motor when finalizing the control system and applying fault-tolerant control algorithms. Use of sensorless vector control allows improving fault-tolerance and expanding the scope of the switched-reluctance motor. To date this topic has not been reviewed sufficiently deeply in technical literature. Moreover, the mathematical and simulation models of sensorless vector control of a switched-reluctance electric drive in emergency non-phase operation mode have not been previously considered.

The main aim of the research is to develop fault-tolerance sensorless vector control algorithms of switched-reluctance electric motor of pump in non-phase operating modes; to ensure control structure switching correctness during phase failure; increase the fault-tolerance of the switched-reluctance electric motor of the pump in emergency operation modes by using fault-tolerant control algorithms under switching the control structure.

Object: four-phase switched-reluctance motor of oil production or transportation pump in emergency non-phase operation modes.

Methods: mathematical and simulation modeling, programming in the MatLab Simulink.

Results. Mathematical and simulation models of a sensorless fault-tolerant four-phase switched-reluctance electric drive in emergency operation mode are developed. A sensorless fault-tolerant control algorithm of a pump with a switched-reluctance motor in emergency operation is received. The characteristics of an oil production pump in an emergency non-phase operation mode of an actuating switched-reluctance electric motor using the fault-tolerance control algorithms were obtained.

Key words:

Switched-reluctance motor, motor phase failure, fault-tolerant electric drive, fault-tolerant control algorithm, sensorless control.

REFERENCES

- Larchenko L.V. Neftegazovaya otrasl Rossii: sovremennoe sostoyaniye i napravleniya razvitiya v usloviyakh neopredelennosti [Oil and gas industry of Russia: current state and directions of development under uncertainty]. *Society. Environment. Development*, 2019, no. 1, pp. 9–13.
- Kunina P.S., Velichko E.I., Stepanov M.S., Muzykantova A.V. Problemy analiza tekhnicheskogo sostoyaniya sovremennykh privodov kompressornykh ustanovok magistralnykh gazoprovodov [Problems of analysis of the technical condition of modern drives of compressor installations of gas pipelines]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2019, no. 3, pp. 56–58.
- Pavlov D.O., Kuznetsov E.M. Bezdatshikovoe opredelenie skorosti v elektropivode ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov [Sensorless speed detection in the electric drive of electric centrifugal pump installations]. *Aktualnye voprosy energetiki* [Actual issues of power engineering]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2016. pp. 147–153.
- Odnokopylov G.I., Bukreev V.G., Rozaev I.A. Research of fault-tolerant switched-reluctance motor of electrical oil pump. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 69–81. In Rus.
- Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual reviews in control*, 2008, vol. 32, no. 2, pp. 229–252.
- Ptah G.K. Ventilno-indukturny reaktivny elektropivod sredney i bolshoy moshchnosti: zarubezhny i otechestvenny opyt [Switched Reluctance Drive Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience]. *Electrical equipment: network electronic scientific magazine*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 23–33.
- Krishnan R. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. Industrial electronics series. USA, CRC Press, 2010. 398 p.
- Sheth N.K., Sekharbabu A.R.C., Rajagopal K.R. Effects of interturn fault in phase winding on the performance of multi-phase doubly salient motors. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2006, vol. 304, no. 1, pp. 207–209.
- Aleksandrovskiy S.V., Petrenko Yu.N. Razrabotka matematicheskoy i imitatsionnoy modeli ventilno-indukturnogo dvigatelya [Development of mathematical and simulation models of switched-reluctance motor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG*, 2011, vol. 2, pp. 15–22.
- Gerling D., Schramm A. Evaluation and comparison of fault tolerant switched reluctance machines for a specific application. *Proc. of the 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE)*. Marbella, Spain, 2005. 5 p.
- Kotin D.A., Pankratov V.V. Principles of vector control and algorithms of field orientation in asynchronized synchronous electric drives. *Mechatronics, automatization, control*, 2010, no. 4, pp. 46–51. In Rus.
- Nos O.V., Volkov V.Y., Klan V.A. Vector control for an AC drive with a multilevel frequency converter based on an N-bridge. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no. 4, pp. 304–309. In Rus.
- Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. Topology optimization of Switched-reluctance motors for the desired torque profile. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 783–796.
- Nguyen Kuang Kkhoa. Issledovanie elektromekhanicheskogo kompleksa: ventilno-indukturny elektropivod – sentrobezhny nasos [Research of electromechanical complex: switched reluctance

- drive – centrifugal pump]. *Letters of higher educational institutions. Electromechanics*, 2016, no. 4, pp. 55–64.
15. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halasz S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. In Rus.
 16. Nesimi Ertugrul, Adrian D. Cheok. Indirect angle estimation in switched reluctance motor drives using fuzzy logic based motor model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, Iss. 15, no. 6, pp. 1029–1044.
 17. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J.. *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques*. New York, Springer, 2003. 282 p.
 18. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–7.
 19. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes. *IFOST 2016: 11th International Forum on Strategic Technology*. Novosibirsk, 1–3 June 2016. Novosibirsk^ Novosibirsk State Technical University, 2016. Vol. 2, pp. 140–144.
 20. Odnokopylov G. I., Rozaev I. A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings*. Omsk, May 21–23, 2015. pp. 1–6.
 21. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85–95. In Rus.
 22. Odnokopylov G.I., Shevchuk V.A., Dementyev Yu.N. Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 131–140. In Rus.
 23. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 24–29.
 24. Liu Z., Wang J., Song X., Tang J., Yang Y. Torque-ripple minimization for switched reluctance motor based on torque sharing function by fuzzy variable angle strategy. *ICIC express letters*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 161–168.
 25. Bateman C.J., Mecrow B.C., Acarnley P.P., Clothier A.C., Tuftnell N.D. sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine. *IEEE transactions on industry applications*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 2329–2337.
 26. Chavylalov M.V. *Bezdatichikovoe opredelenie polozheniya rotora v sisteme upravleniya ventilno-induktorного электропривода*. Dis. Dokt. nauk [Sensorless positioning of the rotor in the control system of a switched-reluctance electric drive. Dr. Diss.]. Rostov-on-Don, 2013. 115 p.
 27. Dos Santos F.L.M., Anthonis J., Naclerio F., Van Der Auweraer H., Gyselinck J.J.C., Góes L.C.S. Multiphysics NVH modeling: simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2014, vol. 61, no. 1, pp. 469–476.
 28. Diab A.A.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Speed control of sensorless induction motor drive based on model predictive control. *International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices*. Novosibirsk, 2013. pp. 269–274.
 29. Petrushin A., Tchavychalov M. Improving the accuracy of switched reluctance motor sensorless rotor position estimation. *Journal of engineering and applied sciences*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 80–84.
 30. Polyakov V., Plotnikov I., Postnikov N. Three-loop control system of energy storage device in the frequency-controlled electric drive. *26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*. Moscow, 2019. pp. 1–5.
 31. Vdovin V.V., Kotin D.A., Pankratov V.V. Adaptivny algoritm vychisleniya koordinat dlya bezdatichikovogo vektornogo upravleniya mashinami dvoynogo pitaniya [Adaptive coordinate calculation algorithm for the sensorless vector control of motors with dual power supplies]. *Bulletin of higher educational institutions. Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 23–27.
 32. Frolov V.Ya., Zhilgotov R.I. Development of a sensorless vector control system for a permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink. *Notes of the Mining Institute*, 2018, vol. 229, pp. 92–97. In Rus.
 33. Ortega R., Sarr A., Bahri I., Diallo D., Bobtsov A. Adaptive state observers for sensorless control of switched reluctance motors. *International journal of robust and nonlinear control*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 990–1006.
 34. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M. Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control. *Buletinul AGIR*. Iasi, Romania, 2011. pp. 129–134.
 35. Nugayev I.F., Iskuzhin R.V. A complex of mathematical models for the synthesis of process control algorithms in oil wells. *Bulletin of USATU*, 2012, vol. 16, no. 8 (53), pp. 36–44. In Rus.
 36. Senthil Murugan L., Maruthupandi P. Sensorless speed control of 6/4-pole switched reluctance motor with ANFIS and fuzzy-PID-based hybrid observer. *Electrical Engineering*, 2020. DOI: 10.1007/s00202-019-00915-5
 37. Wajdi Z., Jalel K., Habib R. Comparative design and modeling study of single sided linear planner switched reluctance motor. *WSEAS transactions on circuits and systems*, 2014, vol. 13, pp. 37–46.
 38. Bychkov M.G., Krasovskiy A.B. Imitation model of rectifier-inductor electric drive with sensorless control. *Bulletin of Moscow State Technical University. N.E. Bauman*, 2011, no. S2, pp. 5–17. In Rus.
 39. Ganji B., Askari M.H. Analysis and modeling of different topologies for linear switched reluctance motor using finite element method. *AEJ – Alexandria engineering journal*, 2016, vol. 55, no. 3, pp. 2531–2538.
 40. Nos O.V., Starostina L.V., Radel U. The synchronous switching of motor power supply from frequency converter to grid for an ac drives with field-oriented vector control. *18th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, conference proceedings*. Novosibirsk, 2017. pp. 511–515.

Received: 5 May 2020.

Information about the authors

Georgy I. Odnokopylov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ivan A. Rozaev, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.