

УДК 62-533.7

РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С МНОГОУРОВНЕВОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Михальченко Сергей Геннадьевич¹,
msg@ie.tusur.ru

Семенов Сергей Михайлович²,
ssm@tpu.ru

Тимошкин Вадим Владимирович²,
timoshkinvv@tpu.ru

Попов Семен Семенович²,
ssp14@tpu.ru

Воронина Наталья Алексеевна²,
voronina@tpu.ru

Афанасьев Кирилл Сергеевич³,
afanks@tpu.ru

¹ Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ АО «НПЦ «Полюс»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Кирова, 56в.

Актуальность исследования обуславливается необходимостью улучшения показателей качества выходных напряжения и тока автономных инверторов напряжения в установках электроцентробежных насосов, применяющихся в нефтедобыче. К основным факторам, позволяющим повысить эти показатели качества, можно отнести: использование перспективных топологий силовой части и современных силовых полупроводниковых ключей, внедрение новых алгоритмов управления. В электроприводах, где применяются частотные преобразователи, возникают негативные факторы, влияющие на функционирование нефтепогружного кабеля и погружного асинхронного двигателя. Несинусоидальность напряжений на выходе преобразователя частоты приводит к повышенному износу изоляции питающей кабельной линии, а также негативно влияет на изоляцию обмоток асинхронного двигателя и снижает показатели качества систем управления электроприводом. Следовательно, поиск путей для улучшения качества выходного напряжения и тока автономных инверторов напряжения в установках электроцентробежных насосов является актуальной задачей.

Цель: разработка алгоритмов для улучшения показателей надежности работы многоуровневых преобразователей и повышение качества гармонического состава выходного напряжения и тока автономных инверторов напряжения в составе электропривода погружного нефтедобывающего насоса.

Объект: автономные инверторы напряжения в составе электропривода погружного нефтедобывающего насоса.

Методы и средства: теория надежности, гармонический анализ, функциональные схемы, коммутационные функции, топология электрических цепей силовых преобразователей, численные методы решения дифференциальных уравнений, быстрое преобразование Фурье, Matlab Simulink.

Результаты. Продемонстрировано значительное улучшение показателей качества тока и напряжения в многоуровневых преобразователях в составе электропривода погружного нефтедобывающего насоса. Рассмотрены возможные способы повышения показателей надежности путем изменения варианта компоновки топологии схемы, при этом вероятность безотказной работы по сравнению с классической компоновкой повысилась с 23,70 до 66,10 %. Установлено, что регулирование частоты коммутации в зависимости от режимов работы в многоуровневых инверторах позволит рационально управлять динамическими потерями и нагрузками на силовые ключи.

Ключевые слова:

Нефтедобыча, погружной двигатель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, гармонические составляющие, многоуровневый инвертор.

Введение

В России сосредоточены большие запасы нефти, которые с течением времени постепенно истощаются, поэтому добывающие компании вынуждены переходить к месторождениям с трудноизвлекаемой нефтью и со значительными затратами на её добычу [1, 2]. Общая себестоимость извлекаемой нефти складывается из многих факторов: климат, удалённость месторождений от инфраструктуры, глубина залегания нефти, качество нефтепродуктов, а также от производительности используемого оборудования [3–5]. Значительная часть себестоимости формируется из затрат на электроэнергию, необходимую для питания электрооборудования. Внедрение частотно-регулируемых электро-

приводов для установок добычи нефти позволило значительно повысить их энергоэффективность и качество управления. Однако многочисленные исследования показали, что при использовании частотного преобразователя в составе электропривода снижается средняя наработка на отказ электродвигателя и кабеля [6]. В процессе эксплуатации установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) с частотными преобразователями (ПЧ) наблюдается ускоренный износ изоляции погружного кабеля. Результатом является оплавление жил и междуфазное замыкание, что приводит к срабатыванию защиты и уходу установки в аварийный останов. Одной из основных причин ускоренного старения изоляции является форма токов и напряже-

ний, которые формируются ПЧ. Полупроводниковые ключи, формирующие выходное напряжение ПЧ, коммутируют с большой частотой, что приводит к появлению существенных градиентов нарастания напряжения и, как следствие, к возникновению перегрузок в кабеле. Таким образом, на участках кабеля формируется повышенное напряжение, что способствует его быстрому износу. Аналогично несинусоидальные токи и напряжения оказывают негативное влияние на асинхронный двигатель (АД), что не учтено в его паспортных данных, где указываются номинальные параметры при работе от источника с синусоидальным напряжением и заданной частотой. В электроприводе с частотным преобразователем в обмотках погружного электродвигателя возникают коронные разряды, которые приводят к ускоренному износу изоляции и последующему выходу из строя электрической машины. Следствием отказов кабеля или погружного двигателя является остановка УЭЦН из-за срабатывания систем защиты и последующие финансовые потери, вызванные простоем скважины и ремонтом оборудования [7–11].

У ПЧ можно выделить следующие недостатки: генерация высших гармоник и несинусоидальность выходного напряжения. Для решения этих проблем можно использовать синусоидальные фильтры или изменить силовую часть ПЧ и системы управления. Из-за большой длины питающего кабеля его можно рассматривать как фильтр, который имеет свои ёмкости и индуктивности и частично уменьшает амплитуду высших гармоник тока, но его изоляция испытывает по-прежнему перегрузки, вызванные существенными градиентами нарастания напряжения [12]. Одним из вариантов, позволяющих повысить качество выходного напряжения, является многоуровневая широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Такой подход дает возможность существенно снизить частоту коммутации силовых ключей, уменьшить коэффициент гармонических искажений напряжений и токов, но это усложняет силовую часть и систему управления, что приводит к более высоким технологическим затратам [13, 14]. Отмеченное выше противоречие делает актуальным исследование режимов работы установок электропитания центробежных насосов с многоуровневой ШИМ.

Исследование «классической» трехфазной ШИМ

Классическая ШИМ основана на сравнении модулирующей функции напряжения с периодической пилообразной функцией. Для определения степени влияния высших гармоник на питающий кабель и АД используется упрощенная схема, которая позволяет оценить коэффициент гармонических искажений и особенности работы структуры. Наиболее распространенный вариант топологии силовой части трехфазного инвертора напряжения показан на рис. 1.

Система управления для трехфазного автономного инвертора напряжения с синусоидальной ШИМ имеет классический вид, показанный на рис. 2. В состав схемы входят блоки: генератор развертывающего

напряжения, компаратор (K) и логические блоки суммирования и умножения.

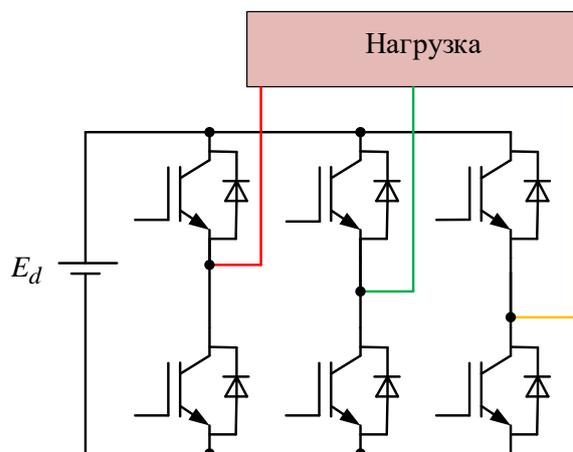


Рис. 1. Упрощенная схема силовой части преобразователя частоты

Fig. 1. Simplified diagram of the power part of the frequency converter

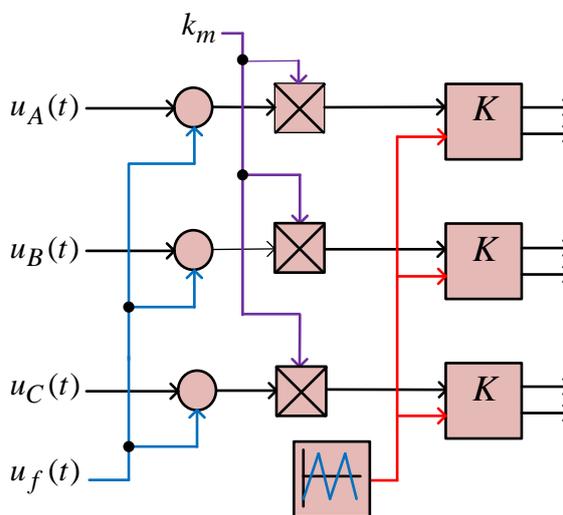


Рис. 2. Функциональная схема системы управления с синусоидальной ШИМ

Fig. 2. Functional diagram of the sinusoidal pulse-width modulation control system

Эталонные входные сигналы соответствующих фаз [15] приведены ниже:

$$\begin{aligned} u_A(t) &= U_m \cdot \sin(2\pi ft), \\ u_B(t) &= U_m \cdot \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_C(t) &= U_m \cdot \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

С помощью коэффициента усиления k_m , приведенного на рис. 2, регулируется величина задающих воздействий. На вход фазных компараторов поступают задающие синусоидальные сигналы и развертывающее напряжение, которое может иметь пилообразную или треугольную форму [16], в частотности однопо-

лярное треугольное развертывающее напряжение ШИМ имеет вид:

$$U_p = U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right). \quad (2)$$

Здесь $f_a(t) = (-1)^{E_1(2t/a)}$ – функция прямоугольного синуса; $E_1 \left(\frac{t}{a} \right)$ – целочисленная функция Антье; $\left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right]$ – функция дробной части; $a = \frac{1}{f_{\text{оп}}}$ – период ШИМ; $U_{\text{оп}}$ – амплитуда развертывающего напряжения [17].

Как правило, для повышения амплитуды выходного напряжения в систему управления вводится сумма сигналов первой и третьей гармоник:

$$U = U_m \cdot \cos(2\pi ft) \quad \text{и} \quad U_f = \frac{1}{6} U_m \cdot \cos(2\pi 3ft).$$

Математическая модель коммутационной функции с ШИМ формируется как сигнум-функция $\xi_A(t)$ разностного уравнения, задающего (1) и развертывающего напряжений (2):

$$KF_A(t) = \frac{1}{2} [\text{sign}(\xi_A) + 1]. \quad (3)$$

При развертывающем однополярном треугольном напряжении коммутационная функция (3) примет вид:

$$KF_A(t) = \frac{1}{2} \text{sign} \left\{ \begin{aligned} &U_m \sin(2\pi ft) - \\ &-U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2}.$$

Подобным образом описываются коммутационные функции других фаз:

$$KF_B(t) = \frac{1}{2} \text{sign} \left\{ \begin{aligned} &U_m \cdot \sin \left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3} \right) - \\ &-U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2};$$

$$KF_C(t) = \frac{1}{2} \text{sign} \left\{ \begin{aligned} &U_m \cdot \sin \left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3} \right) - \\ &-U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2}.$$

Количество воздействий на систему управления, которые позволят повысить качество выходного напряжения и тока, ограничено. В табл. 1 представлены данные, показывающие, каким образом меняются коэффициенты гармонических искажений тока и линейного напряжения (K_i и K_u) при разных параметрах системы управления и с вариациями характера нагрузки. Исследования проводились без предмодуляции третьей гармоники. Вычислительный экспери-

мент с синусоидальной ШИМ был проведен с параметрами: $E_d=535$ В, $R=50$ Ом, $L=0,02$ Гн, соответствующими номиналам экспериментального образца (рис. 5, б), где R и L – параметры нагрузки, имитирующие работу погружного кабеля и электродвигателя в статическом режиме в составе УЭЦН. Детальное исследование влияния ШИМ на внутренние процессы кабеля и погружного двигателя требует привлечения математических моделей более высокого иерархического уровня [12, 18].

Таблица 1. Коэффициенты гармонических искажений тока и линейного напряжения при разных развертывающих сигналах

Table 1. Total harmonic distortions of current and line-to-line voltage

Кэфф. искажения Distortion coefficient	Треугольный опорный сигнал Triangular reference signal				Пилообразный опорный сигнал Sawtooth reference signal			
	R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load		R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load	
	кГц/kHz							
	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$
Частота выходного сигнала $f=50$ Гц/Output frequency $f=50$ Hz								
K_i , %	68,6	68,95	12,44	3,87	68,59	68,63	14,27	4,42
K_u , %	68,62	68,93	68,91	69,25	68,58	68,69	68,89	69,01
Частота выходного сигнала $f=10$ Гц/Output frequency $f=10$ Hz								
K_i , %	68,63	68,95	12,39	3,9	68,58	68,7	14,23	4,41
K_u , %	68,63	68,95	68,95	69,27	68,59	68,7	68,91	69,03

Коэффициенты полных гармонических искажений сигнала K_i и K_u (THD – Total Harmonic Distortion) определялись по выражению [19]:

$$K_u = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_F}, \quad K_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_F}, \quad (4)$$

где I_n – среднеквадратичное значение тока n -й гармоники; U_n – среднеквадратичное значение напряжения n -й гармоники; U_F – среднеквадратичное значение напряжения основной гармоники; I_F – среднеквадратичное значение тока основной гармоники.

На рис. 3, 4 изображены осциллограммы линейного напряжения и тока ($f=50$ Гц) для треугольного опорного сигнала ($f_{\text{оп}}=10$ кГц) с активно-индуктивной нагрузкой.

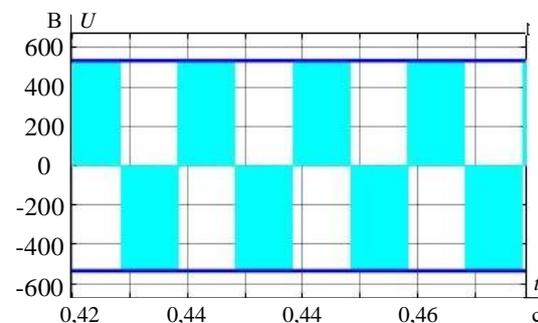


Рис. 3. Осциллограмма линейного напряжения при $f=50$ Гц и $f_{\text{оп}}=10$ кГц и треугольном опорном сигнале

Fig. 3. Oscillogram of line-to-line voltage at $f=50$ Hz and $f_{\text{ref}}=10$ kHz and triangular reference signal

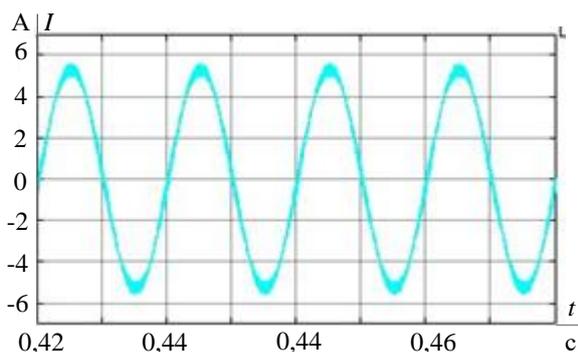


Рис. 4. Осциллограмма тока при $f=50$ Гц и $f_{om}=10$ кГц и треугольном опорном сигнале

Fig. 4. Oscillogram of current at $f=50$ Hz and $f_{ref}=10$ kHz and triangular reference signal

Многоуровневая ШИМ

Для повышения качества выходного напряжения могут быть использованы многоуровневые ШИМ в частотных преобразователях, которые имеют разные схематические представления, один из вариантов показан на рис. 5, где ВП – выпрямитель с источником энергии. Данная схема имеет модульную структуру, где каждая ячейка может запитываться автономно или от одного источника и выполнена на основе однофазной мостовой схемы.

В источниках литературы приводятся разные способы организации системы управления силовыми ключами в многоуровневой ШИМ. В настоящем исследовании применялись алгоритмы управления ячейками (рис. 6) для одной из фаз [20–25].

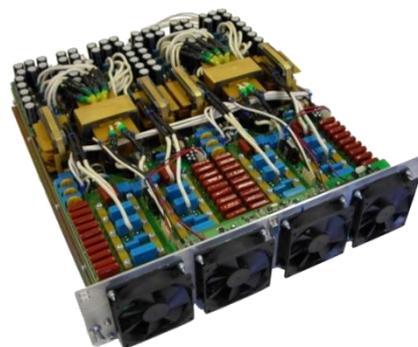
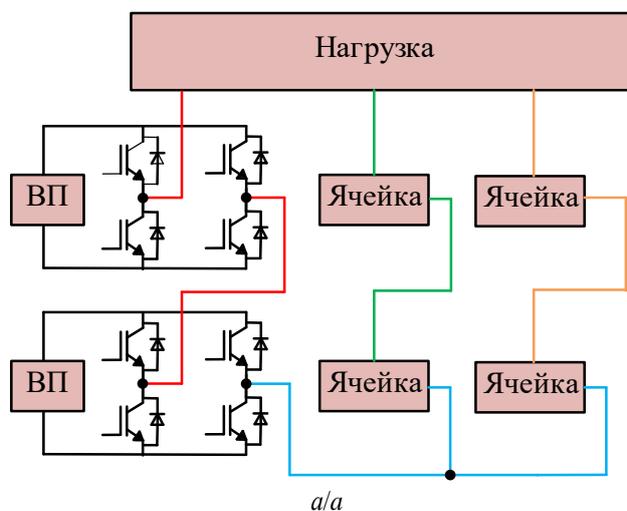


Рис. 5. Многоуровневая широтно-импульсная модуляция: а) функциональная схема; б) экспериментальный макет силовой ячейки

Fig. 5. Multilevel pulse-width modulation: a) functional diagram; b) experimental layout of the power cell

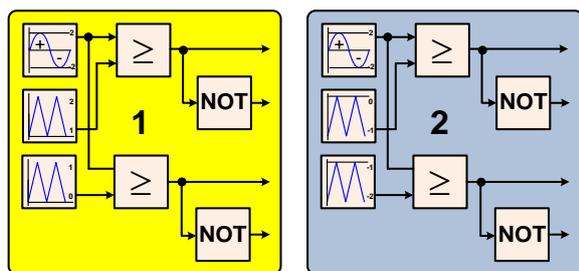


Рис. 6. Функциональная схема системы управления пятиуровневой широтно-импульсной модуляции: 1 – для первой ячейки; 2 – для второй ячейки

Fig. 6. Functional diagram of the five-level pulse-width modulation control system: 1 – for the first cell; 2 – for the second cell

На рис. 6, 7 используются следующие логические блоки: источник синусоидального напряжения, генераторы развертывающего напряжения, компаратор, блок логического отрицания.

В программной среде Matlab Simulink были проведены исследования для многоуровневой ШИМ с различным характером нагрузки и частотой опорного

сигнала. С целью корректного сравнения данных с классической ШИМ было выбрано питание одной ячейки для вариантов: пятиуровневой ШИМ с напряжением 133,75 В; для семиуровневой ШИМ с напряжением 66,875 В (при неизменных параметрах нагрузки). На рис. 7 представлены диаграммы опорных и задающих сигналов для пятиуровневого варианта.

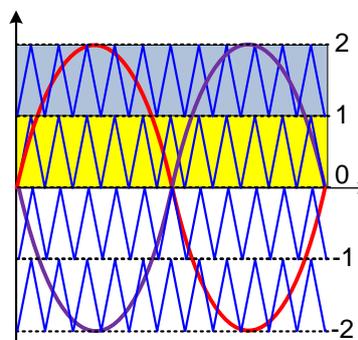


Рис. 7. Диаграммы опорных и задающих сигналов пятиуровневой широтно-импульсной модуляции

Fig. 7. Diagrams of the reference and setpoint signals of the five-level pulse-width modulation

В табл. 2 сведены данные коэффициентов искажения фазных токов и линейных напряжений при работе с активной и активно-индуктивной нагрузкой. Инвертор напряжения с семью уровнями продемонстрировал лучшие показатели, что было ожидаемо.

Коэффициент гармонических искажений для фазного и линейного напряжения в многоуровневой ШИМ будут отличаться, это зависит от количества уровней при формировании сигнала (рис. 8, 9). Здесь показана доля питающего напряжения U_d по отношению к амплитуде линейного и фазного напряжения при пятиуровневой ШИМ при $f=50$ Гц. При увеличении частоты ШИМ коэффициент гармонических искажений для тока начинает снижаться.

Для семиуровневой компоновки можно определить такую частоту опорного сигнала $f_{оп(7)}$, при которой будут обеспечиваться сопоставимые показатели гармонических искажений тока с пятиуровневым вариантом при его работе на частоте $f_{оп(5)}$. При этом $f_{оп(7)}$ меньше, чем $f_{оп(5)}$. Переход с пяти- и на се-

миуровневую схему позволяет снизить коэффициент гармонических искажений для напряжения примерно на 6,6 %. Если сравнивать с классической ШИМ, то качественный рост составит уже 53,62 %. Показатели качества токов и напряжений при работе на пониженной задающей частоте (10 Гц) и полученные на номинальной частоте (50 Гц) практически не отличаются друг от друга. Особенностью многоуровневых ШИМ является то, что возрастает качество выходных токов и напряжений по сравнению с классической ШИМ.

Дальнейшее повышение качества выходного напряжения и тока в частотном преобразователе связано с разработками и исследованиями многоуровневой структуры, которые позволяют повысить количество уровней напряжения без значительного увеличения элементов в силовой цепи. Такие подходы дают возможность в большей степени поднять качество выходного сигнала по сравнению со стандартными схемами и системами управления [26–28].

Таблица 2. Коэффициенты гармонического искажения тока и линейного напряжения в многоуровневых системах

Table 2. Total harmonic distortions of current and line-to-line voltage in multilevel systems

Коэфф. искажения Distortion coefficient	ШИМ/pulse-width modulation							
	Пятиуровневая/5-level				Семиуровневая/7-level			
	R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load		R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load	
	кГц/kHz							
$f_{оп(5)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(5)}=10$ $f_{ref}=10$	$f_{оп(5)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(5)}=10$ $f_{ref}=10$	$f_{оп(7)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(7)}=10$ $f_{ref}=10$	$f_{оп(7)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(7)}=10$ $f_{ref}=10$	
Частота выходного сигнала $f=50$ Гц/Output frequency $f=50$ Hz								
$K_i, \%$	26,80	27,02	5,63	1,74	18,07	18,18	3,86	1,18
$K_u, \%$	21,41	21,67	21,54	21,8	14,96	15,11	15,11	15,25
Частота выходного сигнала $f=10$ Гц/Output frequency $f=10$ Hz								
$K_i, \%$	26,91	26,97	5,56	1,74	18,71	18,20	3,78	1,18
$K_u, \%$	21,55	21,63	21,67	21,76	15,07	15,12	15,21	15,26

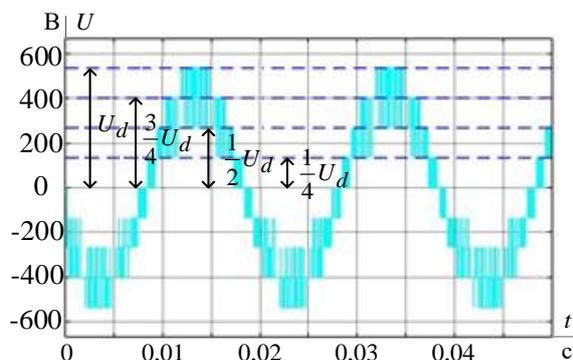


Рис. 8. Линейное напряжение для пятиуровневой ШИМ при $f=50$ Гц

Fig. 8. Line-to-line voltage for 5-level pulse-width modulation at $f=50$ Hz

Повышение надежности многоуровневой ШИМ

В процессе эксплуатации силовых преобразователей часто возникают аварийные ситуации, которые частично или полностью выводят их из строя. Наибольшим нагрузкам подвержены силовые ключи, коммутирующие на высоких частотах и работающие с большими токами. Выход из строя силового ключа приводит к короткому замыканию цепи или ее обры-

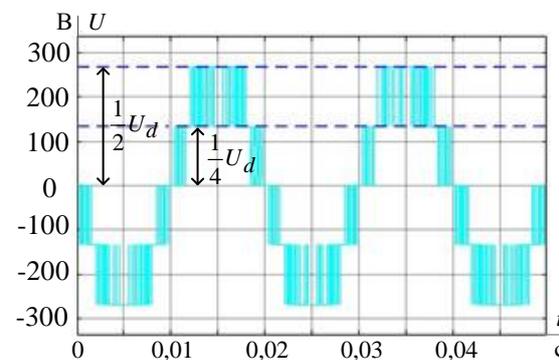


Рис. 9. Фазное напряжение для пятиуровневой ШИМ при $f=50$ Гц

Fig. 9. Phase voltage for 5-level pulse-width modulation at $f=50$ Hz

ву. Самой большой опасностью является короткое замыкание, так как в этом случае транзистор не реагирует на сигналы управления и это приводит к протеканию значительных токов через данный контур. Обрыв цепи ключа является менее опасным, при этом устройство может продолжить свою работу с меньшими показателями качества. А диагностировать в процессе работы тип неисправности в большинстве случаев проблематично [29].

Многоуровневые инверторы напряжения можно использовать не только для улучшения качества напряжения и тока, но и для повышения общей надежности системы благодаря большому числу включенных блоков, которые в случае аварии могут выступать резервирующими элементами. Авария силового преобразователя может остановить добычу и привести к существенным финансовым потерям. При добыче нефти есть ряд определенных требований, которые не позволяют мгновенно остановить технологический процесс. Для решения этой проблемы предложена модифицированная силовая схема многоуровневого инвертора (рис. 10), которая позволяет локализовать проблему и обеспечить высокую работоспособность оборудования. Создание безаварийных

алгоритмов управления и исследование соответствующих режимов их функционирования является актуальной задачей [30–34].

Принцип действия данной безаварийной системы рассматривается на примере выхода из строя одного блока фазы А. При возникновении неисправности внутри инверторов в ячейках 1 или 2 (рис. 10) формируется сигнал аварии на основе датчиков напряжения. Затем с помощью контакторов К2 и К3 осуществляется отключение аварийной ячейки и ее шунтирование. Далее на рабочую ячейку подается удвоенное постоянное напряжение с помощью контакторов К1, К01, К02 и К03, что позволяет сформировать приемлемые показатели гармонических искажений для тока и напряжения, что дает возможность продолжить работу УЭЦН.

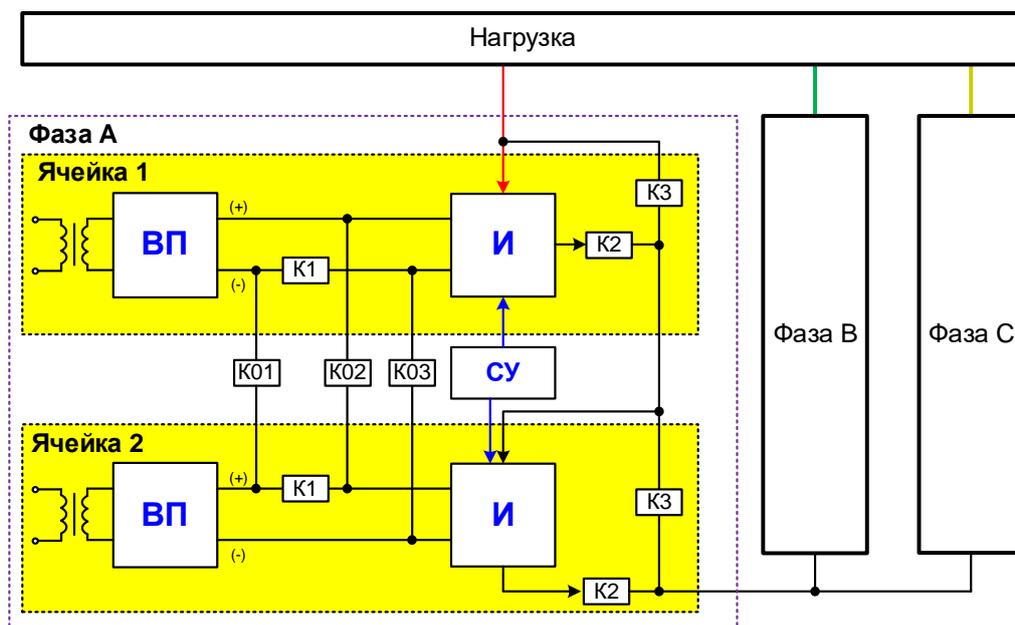


Рис. 10. Функциональная схема для безаварийного управления многоуровневой ШИМ

Fig. 10. Functional diagram for fault-tolerant control of multilevel pulse-width modulation

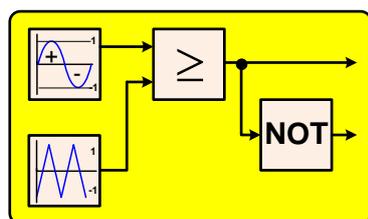


Рис. 11. Алгоритм двухполярной ШИМ

Fig. 11. Bipolar pulse-width modulation algorithm

Для обеспечения приемлемых показателей питания УЭЦН, таких как гармонические искажения тока и напряжения, коэффициент несинусоидальности, необходимо изменить тип управления для рабочей ячейки в соответствии с рис. 11, 12. Здесь проиллюстрированы варианты систем управления силовыми ключами для рабочей ячейки, реализованной на основе мостовой схемы. Алгоритм управления двухполярной ШИМ при этом упрощается, но обеспечивает более низкие показатели гармонических искажений

токов и напряжения по сравнению с однополярным алгоритмом (табл. 3). В данной ситуации рациональным решением является использование однополярной ШИМ.

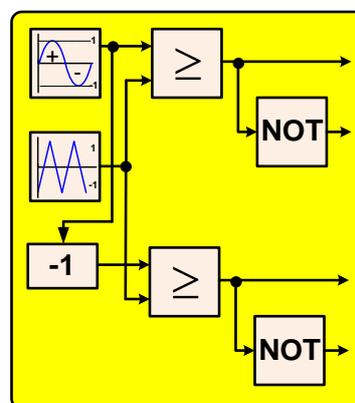


Рис. 12. Алгоритм однополярной ШИМ

Fig. 12. Unipolar pulse-width modulation algorithm

Оценка эффективности предложенной безаварийной системы управления осуществлялась по двум показателям для каждой фазы: коэффициент гармонического искажения согласно уравнению (4) и коэффициент несимметрии, который определялся по выражению:

$$K_H = \frac{1}{T} \int_0^T (i_A(t) + i_B(t) + i_C(t))^2 dt,$$

где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения токов для соответствующих фаз.

При симметричной системе коэффициент K_H должен стремиться к нулю. В табл. 3 приведены рассчитанные коэффициенты для различных режимов работы пятиуровневого инвертора напряжения при активно-индуктивной нагрузке. Расчеты осуществлялись на основе имитационной модели в программной среде Matlab Simulink.

Таблица 3. Коэффициенты несимметрии и гармонических искажений токов и напряжений при разных режимах работы многоуровневого инвертора

Table 3. Total harmonic distortions and unbalance of current and line-to-line voltage at different operating modes of the multilevel inverter

Фазные токи Phase currents			Фазные напряжения Phase voltages			K_H	Режимы работы Modes of operation
I_a	I_b	I_c	U_a	U_b	U_c		
%							
1,74	1,74	1,74	27,18	27,2	27,20	0,01497	Нормальный режим работы Normal operation mode
1,74	1,74	12,31	27,18	27,2	116,98	2,859	Аварийный режим работы Emergency operation mode
1,74	1,74	35,77	27,18	27,2	65,61	5,465	Шунтирование аварийной ячейки Bypassing the emergency cell
1,74	1,74	35,77	27,18	27,2	65,51	1,751	Шунтирование аварийной ячейки с повышением напряжения Bypassing the emergency cell with voltage boost
1,74	1,74	1,79	27,18	27,2	52,88	0,01278	Безаварийное управление (однополярный алгоритм управления) Fault-tolerant control (unipolar control algorithm)
1,73	1,73	6,3	27,18	27,2	100,88	0,06443	Безаварийное управление (двухполярный алгоритм управления) Fault-tolerant control (bipolar control algorithm)

Для сравнения на рис. 13, 14 изображены осциллограммы напряжений и токов для нормального режима работы многоуровневого инвертора. Из этих графика

следует, что токи имеют практически идеальный синусоидальный вид, а напряжения формируются по многоуровневой системе.

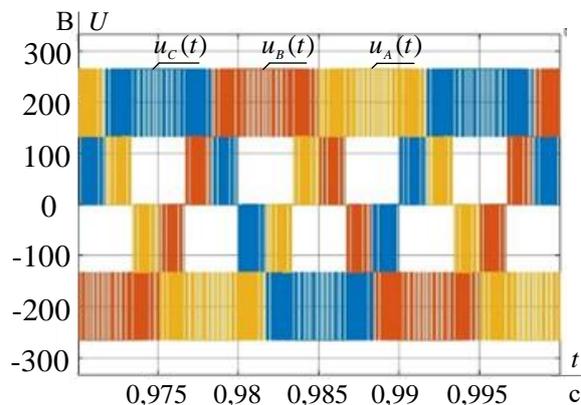


Рис. 13. Фазные напряжения при нормальном режиме работы

Fig. 13. Phase voltages during normal operation

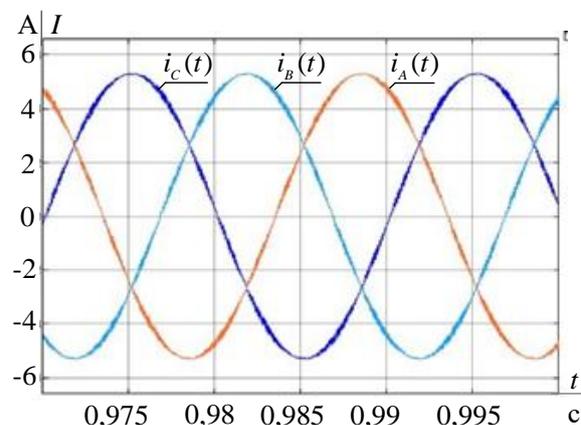


Рис. 14. Фазные токи при нормальном режиме работы

Fig. 14. Phase currents during normal operation

В соответствии с результатами моделирования на рис. 15, 16 показаны токи и напряжения при выходе из строя одного силового ключа в ячейке, при котором появляется неисправность вида «разрыв».

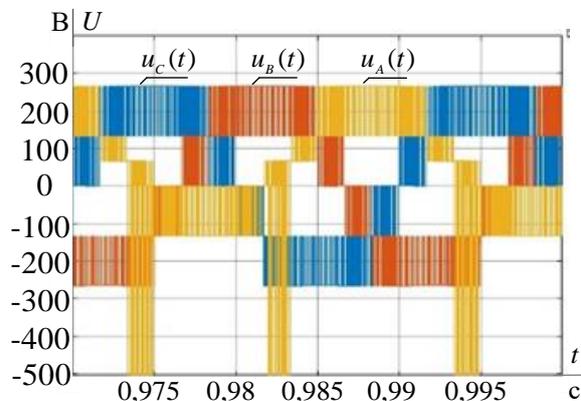


Рис. 15. Фазные напряжения при аварийном режиме работы

Fig. 15. Phase voltages during fault-tolerant operation

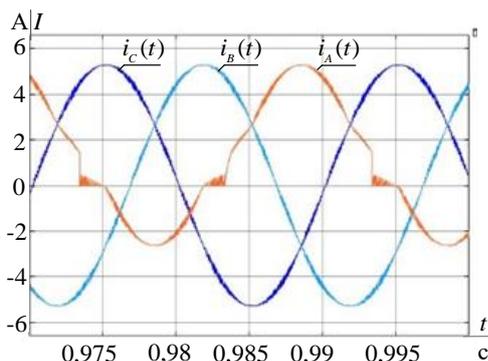


Рис. 16. Фазные токи при аварийном режиме работы
 Fig. 16. Phase currents during fault-tolerant operation

Такая неисправность оказывает влияние на работу силового преобразователя, что видно из изменения формы сигналов для тока и напряжения по аварийной фазе. Ясно, что коэффициенты искажения для тока и напряжения увеличиваются, а также появляется несимметрия токов фаз. При запитывании асинхронного двигателя данным типом напряжения появляются колебания электромагнитного момента, и при этом снижается мощность на валу АД в зависимости от реальных значений параметров машины [35].

Система верхнего уровня управления ПЧ, обнаружив и идентифицировав фазу аварийного режима работы, переходит на один из алгоритмов безаварийного ШИМ управления ключами соответствующей фазы.

При использовании алгоритмов безаварийного управления с однополярной ШИМ на выходе многоуровневого инвертора были получены соответствующие осциллограммы фазных напряжений (рис. 17) и токов (рис. 18), в том числе и для аварийной фазы А. Эти графики позволяют сделать вывод, что система является симметричной, а коэффициенты искажений тока и напряжения в аварийной фазе хуже, чем при нормальном режиме работы, но остаются на удовлетворительном уровне (табл. 3). В этой ситуации система может проработать до замены силового преобразователя или устранения неисправности.

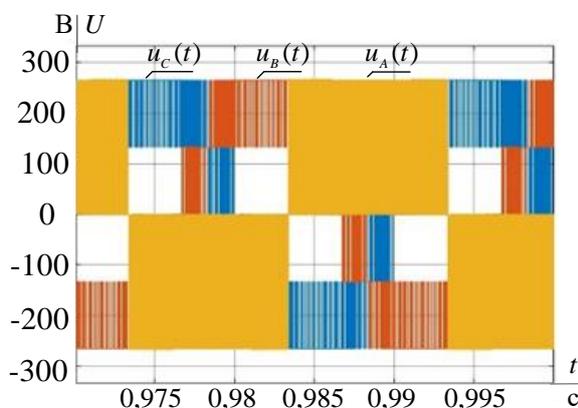


Рис. 17. Фазные напряжения при безаварийном варианте работы и однополярном алгоритме управления
 Fig. 17. Phase voltages during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

Fig. 17. Phase voltages during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

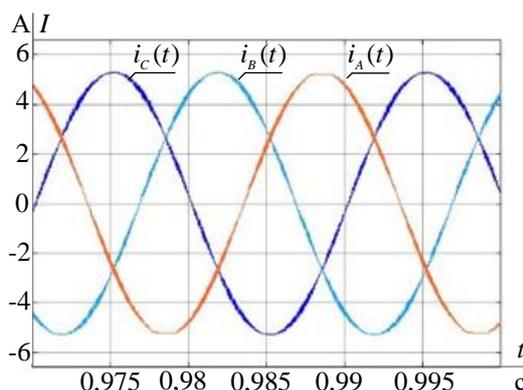


Рис. 18. Фазные токи при безаварийном варианте работы и однополярном алгоритме управления
 Fig. 18. Phase currents during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

Fig. 18. Phase currents during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

В случае аварии возможен алгоритм управления в однополярном или двухполярном режиме (рис. 11, 12). При использовании однополярной ШИМ (рис. 11) для безаварийной системы управления коэффициенты искажения тока и напряжения лучше, чем для двухполярной ШИМ (рис. 12), что подтверждают графики на рис. 19, 20.

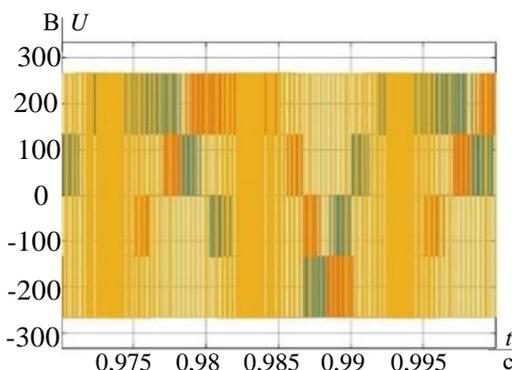


Рис. 19. Фазные напряжения при безаварийном варианте работы и двухполярном алгоритме управления
 Fig. 19. Phase voltages during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

Fig. 19. Phase voltages during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

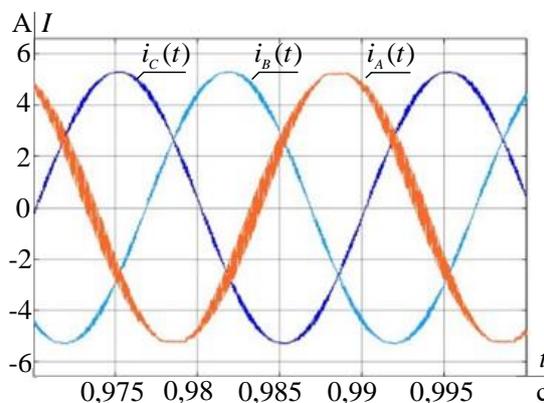


Рис. 20. Фазные токи при безаварийном варианте работы и двухполярном алгоритме управления
 Fig. 20. Phase currents during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

Fig. 20. Phase currents during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

Наличие двух алгоритмов позволяет с большой гибкостью управлять коммутацией силовых ключей преобразователя в зависимости от того, какой вид аварии силового элемента произошел (короткое замыкание, разрыв). Это позволяет повысить показатели надежности силового преобразователя.

Рассмотрим вероятность безотказной работы силового преобразователя с учетом использования многоуровневых структур в качестве резервных. Исходя из технических документаций и научных трудов по силовым ключам [36–38] принимаем вероятность безотказной работы одного транзисторного ключа $P_T(t) = 48,68\%$ в течение 15000 ч. Тогда данный показатель для одной фазы последовательно включенных силовых транзисторов (вариант классической ШИМ, рис. 1) составит $P(t) = P_T^2(t) = 23,70\%$. В предполагаемом безаварийном управлении для пятиуровневого инвертора ячейки рассматриваются как взаиморезервирующие друг друга, поэтому вероятность одновременного выхода двух ячеек на одной фазе будет ниже, а вероятность безотказной работы выше $P(t) = 66,10\%$ вследствие послеаварийного изменения топологии схемы (рис. 10), т. е. повысится в 2,79 раза.

Результаты данной работы позволяют спрогнозировать следующие пути увеличения показателей надежности. Они связаны с обеспечением возможности подключения к аварийной фазе ячеек с других безаварийных фаз. При выходе из строя всех ячеек одной фазы возможности резервирования в режиме реального времени отсутствуют в рассмотренном безаварийном алгоритме управления. Выходом при такой неполадке является использование силового мо-

дуля с другой фазы. В этой ситуации две из трех фаз должны работать по безаварийному алгоритму.

Заключение

1. Высокочастотная коммутация с резко возрастающими фронтами в инверторе напряжения оказывает негативное влияние на обмотки двигателя и непосредственно силовой кабель, что приводит к ускоренному старению изоляции и выходу из строя оборудования. Анализ многоуровневых ШИМ показал, что увеличение количества уровней напряжения позволяет существенно улучшить коэффициент гармонических искажений токов и напряжений и таким образом снизить негативное влияние силового преобразователя на кабель и двигатель.
2. При использовании многоуровневой широтно-импульсной модуляции можно существенно снизить частоту коммутации ключей при обеспечении оптимальных показателей коэффициентов искажения токов и напряжений.
3. Регулирование частоты коммутации в зависимости от режимов работы в многоуровневых инверторах позволит рационально управлять динамическими потерями и нагрузками на силовые ключи.
4. Многоячейчатая структура инвертора напряжения допускает увеличение показателей надежности, к примеру, вероятность безотказной работы по сравнению с классической с 23,70 до 66,10 %, и обеспечивает работу оборудования на срок устранения неисправности с удовлетворительными показателями качества токов и напряжений, но ухудшает гармонический состав при работе в безаварийном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сажин В.В., Селдинас И., Сажин В.Б. Трудноизвлекаемые запасы и «Тяжелые нефти» России // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 92. – № 12. – С. 56–68.
2. Шарф И.В., Борзенкова Д.Н. Трудноизвлекаемые запасы нефти: понятие, классификационные подходы и стимулирование разработки // Фундаментальные исследования. – 2015. – Т. 16. – № 2. – С. 3593–3597.
3. Ал-Нашар Р.А. Формирование себестоимости добычи нефти // Вестник науки и образования. – 2021. – Т. 114. – № 11. – С. 49–53.
4. Мамедова М.Б. Многофакторная модель оценки и прогнозирования себестоимости добычи нефти для длительно разрабатываемых месторождений // Актуальные проблемы гуманитарных наук и естественных наук. – 2009. – № 9. – С. 89–95.
5. Модорская Г.Г., Исаева М.А., Сичинава Ю.В. Внешние факторы, влияющие на себестоимость добычи нефти // Скиф. Вопросы студенческой науки. – 2020. – Т. 52. – № 12. – С. 95–105.
6. Влияние преобразователей частоты на изоляцию силовых кабелей нефтедобывающих станций / Д.И. Зализный, О.Г. Широков, С.Н. Кухаренко, Е.Ю. Устименко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 1. – С. 17–23.
7. Коробцов А.А., Леонов А.П., Похолков Ю.П. Применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением // Наука и техника. – 2013. – Т. 340. – № 3. – С. 16–18.
8. A method for endurance testing of enameled round and rectangular wires for motors controlled by SiC-based inverters / V. Gavrilenko, A. Leonov, A. Bukharin, S. Hlioui, S. Lefebvre // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2021. – V. 28. – Iss. 6. – P. 2091–2098.
9. Молодых А.В., Старокожев А.И. Проблема «Длинного кабеля» в частотно-регулируемом электроприводе и возможные способы ее решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 8. – С. 323–327.
10. Бородин А.В. Особенности исследования работы системы ПЧ с ШИМ-кабель-АД // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 2. – С. 36–38.
11. Improving the heat resistance of polymer electrical insulation systems for the modernization of induction motors / A. Leonov, T. Usacheva, D. Lyapunov, N. Voronina, O. Galtseva, A. Rogachev // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – V. 18. – Iss. 1. – P. 34–42.
12. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
13. Стариков А.В., Лисин С.Л., Рокало Д.Ю. Влияние широтно-импульсной модуляции на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – Т. 61. – № 1. – С. 153–166.
14. Хакимьянов М.И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: дис. ... д-ра техн. наук. – Уфа, 2018. – 355 с.
15. Система управления с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией трехфазного инвертора при частотном скалярном управлении асинхронным двигателем / Ю.Н. Дементьев, К.Н. Негодин, Н.В. Кояин, Л.С. Удут // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – Т. 546. – № 4. – С. 49–54.

16. Бифуркационные явления в преобразователе напряжения с частотно-импульсным управлением для ветрогенераторной установки / С.Г. Михальченко, Г.Я. Михальченко, С.М. Семенов, П.С. Мешеряков, Н.А. Воронина, А.М. Зюзев // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 215–225.
17. Метод коммутационно-разрывных и модуляционных функций при анализе процессов в преобразователях частоты / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, Д.С. Муликов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 203–209.
18. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.В. Лавринович // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 154–167.
19. ГОСТ ИЕС 62040-3-2018 Системы бесперебойного энергоснабжения. Ч. 3. Метод установления эксплуатационных характеристик и требования к испытаниям. – М.: Стандартинформ, 2018. – 90 с.
20. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. – Иваново: ФГБОУВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2018. – 184 с.
21. Баховцев И.А. Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2017. – 452 с.
22. Анисимова Т.В., Данилина А.Н. Инверторы с многозонной модуляцией // Труды Московского авиационного института. – 2012. – № 52. – С. 26–41.
23. McGrath B.P., Holmes D.G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2002. – V. 49. – Iss. 4. – P. 858–867.
24. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.G. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2002. – V. 49. – Iss. 4. – P. 724–738.
25. Rathore S., Kirar M.K., Bhardwaj S.K. Simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques // Electrical & Computer Engineering: an International Journal. – 2015. – V. 4. – Iss. 3. – P. 27–41.
26. Improved modulation strategy for single-phase cascaded H-Bridge multilevel inverter / X. Guo, X. Wang, C. Wang, Z. Lu, C. Hua, F. Blaabjerg // IEEE Transactions of power electronics. – 2002. – V. 49. – Iss. 4. – P. 724–738.
27. Speeravathy L. Cascaded multilevel inverter with developed H bridge units // International Journal of Science and Research. – 2015. – V. 4. – Iss. 9. – P. 952–957.
28. Closed-loop power supply for an autonomous object with a DC power transmission line and voltage drop compensation / V. Chekh, V. Rulevskiy, A. Pravikova, D. Lyapunov // 16th International Conference on Electronic Devices and Control Systems. Journal of Physics: Conference series. – 2020. – V. 1862. – Iss. 1. – P. 1–6.
29. Проблемы обеспечения безопасности силовых ключей в аварийных режимах / А. Винтрич, Н. Ульрих, Т. Вернер, Р. Тобиас // Силовая электроника. – 2013. – № 4. – С. 50–58.
30. Трегуб Д.П., Доброскок Н.А. Исследование работы каскадного преобразователя в несимметричном режиме // Наука настоящего и будущего. – 2019. – Т. 1. – С. 248–252.
31. Трегуб Д.П. Исследование аварийных режимов работы каскадного преобразователя частоты частотно-регулируемого электропривода // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 126–135.
32. Narasimha Rao M., Karthick N., Madhukar Rao A. Fault tolerant ability of a multilevel inverter fed three phase induction motor for water pumping application // 2021 7th International conference on electrical energy systems. – Chennai, 2021. – P. 212–216.
33. Fault-tolerant asymmetrical multilevel inverter with preserved output power under post-fault operation / A. Chappa, S. Gupta, L. Kumar Sahu, K. Kumar Gupta, H. Vahedi // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2022. – V. 69. – Iss. 7. – P. 6764–6773.
34. Nos O.V., Dybko M.A., Nos N.I. Control algorithms for a multilevel voltage inverter with cascading H-bridges during emergency operation // Russian Electrical Engineering. – 2021. – V. 92. – Iss. 12. – P. 755–760.
35. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214.
36. Behrooz M. Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2014. – V. 61. – Iss. 10. – P. 5192–5202.
37. Julian A.L., Orti G. A comparison of redundant inverter topologies to improve voltage source inverter reliability // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2007. – V. 43. – Iss. 5. – P. 1674–1678.
38. A multilevel converter topology with fault-tolerant ability // A. Chen, L. Hu, L. Chen, Y. Deng, X. He // IEEE Transactions of power electronics. – 2005. – V. 20. – Iss. 2. – P. 405–415.

Поступила 29.06.2022 г.

Информация об авторах

Михальченко С.Г., доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Тимошкин В.В., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Воронина Н.А., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Семенов С.М., старший преподаватель Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Попов С.С., магистрант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Афанасьев К.С., кандидат технических наук, инженер-конструктор II категории АО «НПЦ «Полнос».

UDC 62-533.7

SUPPLY MODES OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS WITH MULTILEVEL PULSE-WIDTH MODULATION

Sergey G. Mikhailchenko¹,
msg@ie.tusur.ru

Vadim V. Timoshkin²,
timoshkinvv@tpu.ru

Nataliya A. Voronina²,
voronina@tpu.ru

Sergey M. Semenov²,
ssm@tpu.ru

Semen S. Popov²,
ssp14@tpu.ru

Kirill S. Afanasiev³,
afanks@tpu.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ JSC «Scientific & Industrial Centre «Polyus»,
56v, Kirov avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to improve the quality factors of output voltage and current of voltage inverters in electric submersible pumps, used in oil production. The main aspects, which allow improving these quality factors are: usage of perspective topologies of power part and modern power semiconductor keys, implementation of new control algorithms. In electric drives, where frequency converters are used, there are negative factors, affecting oil-submersible cable and submersible induction motor functioning. Non-sinusoidal voltages at the frequency converter output lead to increased wear and tear of the supply cable insulation, and also negatively affect the insulation of induction motor windings and reduce the quality indicators of electric drive control systems. Consequently, the search for ways to improve the quality of the output voltage and current of the voltage inverters in electric submersible pumps is a critical task.

The main aim of the research is to develop the algorithms to improve the reliability indicators of multilevel converters and upgrade the quality of harmonic composition of the output voltage and current of voltage inverters as part of the electric drive of a submersible oil-producing pump.

Object: voltage inverters as a part of electric drive of submersible oil producing pump.

Methods and tools: reliability theory, harmonic analysis, functional diagrams, switching functions, topology of electric circuits of power converters, numerical methods for solving differential equations, fast Fourier transform, Matlab Simulink.

Results. Significant improvement of current and voltage quality factors in multilevel converters as a part of electric drive of submersible oil-producing pump has been demonstrated. Possible ways to improve reliability indicators by changing the layout option of the circuit topology have been considered, with the probability of no-failure operation increasing from 23,70 to 66,10 % as compared to the classical layout. It is established that regulation of switching frequency depending on operating modes in multilevel inverters will allow controlling rationally dynamic losses and loads on power keys.

Key words:

Oil production, submersible motor, frequency converter, pulse-width modulation, harmonic components, multilevel inverter.

REFERENCES

- Sazhin V.V., Seldinas I., Sazhin V.B. Trudnoizvlekaemye zapasy i «Zapasy nefti» Rossii [Hard-to-recover reserves and Russia's Heavy Oil]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2008, vol. 92, no. 12, pp. 56–68.
- Sharf I.V., Borzenkova D.N. Unconventional oil: definition, classification approaches and development stimulation. *Fundamental Research*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 3593–3597. In Rus.
- Al-Nashar R.A. The formation of the cost price of petrol. *Herald of Science and Education*, 2021, vol. 114, no. 11, pp. 49–53. In Rus.
- Mamedova M.B. Multifactor model of evaluation and forecasting of oil production cost for the long-term development fields. *Actual problems of humanities and natural sciences*, 2009, no. 9, pp. 89–95. In Rus.
- Modorskaya G.G., Isaeva M.A., Sichinava Y.V. External factors affecting the cost of oil production. *Skiff. Questions of Students Science*, 2020, vol. 52, no. 12, pp. 95–105. In Rus.
- Zalozniy D.I., Shirokov O.G., Kukharenskiy S.N., Ustimenko E.Yu. Vliyanie preobrazovateley chastoty na izolyatsiy silovikh kabeley nefte dobyvaushchikh stantsiy [Effect of frequency converters on the insulation of power cables of oil production stations] *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG*, 2011, no. 1, pp. 17–23.
- Korobtsev A.A., Leonov A.P., Pokholkov Yu.P. Primenenie emalirovannykh provodov v obmotkakh asinkhronnykh dvigateley s chastoym upravleniem [Application of enameled wires in the windings of frequency-controlled induction motors]. *Kabeli i provoda*, 2013, vol. 340, no. 3, pp. 16–18.
- A method for endurance testing of enameled round and rectangular wires for motors controlled by SiC-based inverters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 2091–2098.
- Molodykh A.V., Starokozhev A.I. «Long cable» problem in variable frequency electric drives and possible ways to solve it. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 8, pp. 323–327. In Rus.
- Borodin A.V. Osobennosti issledovaniya raboty sistemy PCH s SHIM-kabel-AD [Peculiarities of research of frequency converter system operation with PWM-cable-ID]. *Vesntik Kuzvasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 2, pp. 36–38.
- Leonov A., Usacheva T., Lyapunov D., Voronina N., Galtseva O., Rogachev A. Improving the heat resistance of polymer electrical insulation systems for the modernization of induction motors. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 34–42.
- Glazyrin A.S., Langraf S.V., Isaev Y.N., Filipas A.A., Kladiyev S.N., Kopyrin V.A., Leonov A.P., Khamitov R.N., Rakov I.V., Kovalev V.Z., Kolesnikov S.V., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulle-*

- tin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. In Rus.
13. Starikov A.V., Lisin S.L., Rokalo D.Yu. Influence of the pulse-width modulation on the harmonic composition of the output voltage of a frequency converter. *Bulletin of Samara state technical university, Series: «Engineering science»*, 2019, vol. 61, no. 1, pp. 153–166. In Rus.
 14. Hakimyanov M.I. *Povysheniye energoeffektivnosti i optimizatsiya rezhimov raboty elektroprivodov v nefteobivayushey promishlennosti*. Diss. Dokt. nauk [Improvement of energy efficiency and optimization of operation modes of electric drives in oil production industry. Dr. Diss.]. Ufa, 2018. 355 p.
 15. Dementiyev Yu.N., Negodin K.N., Koyain N.V., Uduy L.S. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor. *Russian electromechanics*, 2016, vol. 546, no. 4, pp. 49–54. In Rus.
 16. Mikhailchenko S.G., Semenov S.M., Meshcheryakov P.S., Voronina N.A., Ziuzev A.M. Bifurcation phenomena in voltage converter with frequency-pulse control for a wind generator. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 215–225. In Rus.
 17. Kobzev A.V., Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G., Mulikov D.S. Method of switching-discontinuous and modulation function in the analysis of processes in frequency converters. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 203–209. In Rus.
 18. Glazyrin A.S., Isaev Y.N., Kladiyev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. In Rus.
 19. GOST IEC 62040-3-2018. *Sistemy bespereboynogo energosnabzheniya. Chast 3. Metod ustanovleniya ekspluatatsionnykh kharakteristik i trebovaniya k ispytaniyam* [State Standart 62040-3-2018. Uninterruptible power systems. P. 3. Method of specifying the performance and test requirements]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 90 p.
 20. Vinogradov V.B., Korotkov A.A. *Algoritmy upravleniya vysokovoltным mnogourovnevnyim preobrazovatelem chastoty* [Control algorithms for a high-voltage multilevel frequency converter]. Ivanovo, Ivanovo energy state university Publ., 2018. 184 p.
 21. Bahovtsev I.A. *Analiz i sintez energooptimalnykh sposobov upravleniya invertorami s ShIM*. Diss. Dokt. nauk [Analysis and synthesis of energy-optimal control methods for PWM inverters. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2017. 452 p.
 22. Anisimova T.V., Danilina A.N. *Inventory s mnogozonnoy modulyatsiyey* [Inverter with multilevel modulation]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, no. 52, pp. 26–41.
 23. McGrath B.P., Holmes D.G. Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 858–867.
 24. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.G. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724–738.
 25. Rathore S., Kirar M.K., Bhardwaj S.K. Simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques. *Electrical & Computer Engineering: an International Journal*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 27–41.
 26. Guo X., Wang X., Wang C., Lu Z., Hua C., Blaabjerg F. Improved modulation strategy for single-phase cascaded H-Bridge multilevel inverter. *IEEE Transactions of power electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724–738.
 27. Speeravathy L. Cascaded multilevel inverter with developed H bridge units. *International Journal of Science and Research*, 2015, vol. 4, no. 9, pp. 952–957.
 28. Chekh V., Rulevskiy V., Pravikova A., Lyapunov D. Closed-loop power supply for an autonomous object with a DC power transmission line and voltage drop compensation. *16th International Conference on Electronic Devices and Control Systems. Journal of Physics: Conference series*, 2020, vol. 1862, no. 1, pp. 1–6.
 29. Wintrich A., Ulrich N., Werner T., Tobias R. Problemy obespecheniya bezopasnosti silovyykh klyuchey v avariynnykh rezhimakh [Problems of ensuring the safety of power switches in emergency modes]. *Silovaya elektronika*, 2013, no. 4, pp. 50–58.
 30. Tregub D.R., Dobroskok N.A. Issledovanie raboty kaskadnogo preobrazovatelya v nesimetrichnom rezhime [Study of cascade converter operation in asymmetric mode]. *Nauka nastoyashego i buduschego*, 2019, vol. 1, pp. 248–252.
 31. Tregub D.R. Issledovanie avariynnykh rezhimov raboty kaskadnogo preobrazovatelya chastoty chastotnogo-reguliruemogo elektroprivoda [Study of emergency modes of cascade frequency converter of variable frequency drive]. *Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki* [Problems and prospects of development of electric power and electrical engineering]. Kazan, Kazan state energy university Publ., 2019. pp. 126–135.
 32. Narasimha Rao M., Karthick N., Madhukar Rao A. Fault tolerant ability of a multilevel inverter fed three phase induction motor for water pumping application. *2021 7th International conference on electrical energy systems*. Chennai, 2021. pp. 212–216.
 33. Chappa A., Gupta S., Kumar Sahu L., Kumar Gupta K., Vahedi H. Fault-tolerant asymmetrical multilevel inverter with preserved output power under post-fault operation. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2022, vol. 69, no. 7, pp. 6764–6773.
 34. Nos O.V., Dybko M.A., Nos N.I. Control algorithms for a multilevel voltage inverter with cascading H-Bridges during emergency operation. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 12, pp. 755–760.
 35. Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiyev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
 36. Behrooz M. Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2014, vol. 61, no. 10, pp. 5192–5202.
 37. Julian A. L., Orti G. A comparison of redundant inverter topologies to improve voltage source inverter reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, vol. 43, no. 5, pp. 1674–1678.
 38. Chen A., Hu L., Chen L., Deng Y., He X. A multilevel converter topology with fault-tolerant ability. *IEEE Transactions of power electronics*, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 405–415.

Received: 29 June 2022.

Information about the authors

Sergey G. Mikhailchenko, Dr. Sc., head of Industry Electronics Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Vadim V. Timoshkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nataliya A. Voronina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey M. Semenov, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Semen S. Popov, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kirill S. Afanasiev, Cand. Sc., design engineer, JSC «Scientific & Industrial Centre «Polyus».