

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

А.В. Коржов, Ю.И. Хохлов, М.А. Григорьев, Д.Ю. Хрюкин, В.А. Кушнарев
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Современные электроприводы, применяемые в нефтегазовом секторе, выполняются по двухуровневым схемам силовых цепей на напряжение до 1 кВ и имеют модульное шкафное исполнение. С целью обеспечения бесперебойной работы критически важных объектов нефтегазового применения представлены способы улучшения путем оптимизации количества фаз модульных преобразователей частоты. Методом численного анализа были выведены критерии оптимизации количества фаз силовых цепей преобразователя по стоимости, электрическим потерям и надежности, основанные на данных стоимости двухуровневых преобразователей частоты. Дано экономическое обоснование снижения капитальных и эксплуатационных затрат при применении многоуровневых преобразователей частоты. Выявлено, что предложенные методы оптимизации позволяют снизить электрические потери благодаря снижению перенапряжений на электромеханическом преобразователе, а также снижению перенапряжений в звене постоянного тока. Повышение надежности обуславливается работоспособностью электромеханического преобразователя в случае отказа одной из его фазной обмотки, с учетом снижения установленной мощности. Представлены результаты внедрения многоуровневых преобразователей частоты «МОМЕНТУМ» серии МТ-1000/МТ-2000 компании ООО НТЦ «Приводная техника».

Ключевые слова: многоуровневый преобразователь частоты, повышение надежности, электрические потери, буровая установка.

Введение

Горнодобывающая и нефтегазовая промышленности продолжают развиваться и приносят в бюджет Российской Федерации существенную часть прибыли. Конкуренция среди как добывающих компаний, так и осуществляющих сервисные услуги, усиливается. Гонка компаний за экономией на строительстве скважин и добыче ископаемых остается актуальной научно-технической задачей. На строительстве нефтегазовых скважин долгое время электроприводы главных механизмов буровой установки выполнялись на постоянном токе. Электрооборудование эшелонных буровых установок размещается в специальных контейнерах, расположенных на эшелоне установки. Условия охлаждения и габаритные размеры данных контейнеров изначально рассчитывались для размещения тиристорных преобразователей приводов постоянного тока.

ООО НТЦ «Приводная техника» (г. Челябинск) первым в России внедрило электроприводы буровых насосов на базе частотно-регулируемого электропривода. В настоящее время большинство реализуемых проектов по модернизации главных механизмов буровых установок либо вновь вводимых в эксплуатацию проектируются на базе электроприводов постоянного тока с активным выпрямителем.

Однако при реализации проектов возникли и первые проблемы модернизации. В электроприводах переменного тока коммутационные потери на 1–2 % выше, чем в приводах постоянного тока [1].

Данные потери приходятся на повышенный нагрев внутри контейнера с электрооборудованием. Повышенный нагрев преобразователей частоты ведет к периодическим аварийным остановкам главных механизмов, что увеличивает непроизводительное время буровой установки. Помимо этого, в результате воздействия повышенного нагрева жизненный цикл преобразователя также сокращается, что требует более частого обслуживания. Многоуровневые преобразователи частоты таких недостатков не имеют, поскольку алгоритмы управления транзисторными ключами сочетают возможности амплитудной и широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Выбор оптимального закона ШИМ и применение амплитудной модуляции обеспечивают существенное снижение коммутационных потерь в сравнении с классическими законами управления вентилями. Это объясняется меньшим напряжением коммутации на шине постоянного тока. Современные законы управления позволяют решать задачи, связанные не только с коммутационными потерями [2], а также способны повышать качество тока, потребляемого из сети, что актуально для автономных энергосистем и систем с недостаточной мощностью [3]. До сих пор актуальны вопросы эксплуатационных затрат, поскольку необходимо соблюдать требования по надежности в нефтегазовом применении. Так, при выходе из строя одного из главных механизмов буровой установки останавливается весь технологический процесс и силы буровой бригады направляются на устранение аварии. Сутки непроиз-

востественного времени (НПВ) могут привести к убыткам проекта свыше миллиона рублей, что сопоставимо со стоимостью одного силового модуля преобразователя.

Выбор схемы силовых цепей

На протяжении нескольких лет многоуровневые преобразователи частоты применялись исключительно в высоковольтных топологиях, что оправдывалось высокой стоимостью силовых полупроводниковых ключей. С развитием производства полупроводниковой техники стоимость силовых ключей снизилась, в то же время активно проектируются и внедряются высокоэффективные многофазные электромеханические преобразователи, для эффективной работы которых необходима многоуровневая топология преобразователя [4].

Высокая стоимость полупроводниковых вентиляционных модулей на протяжении нескольких лет была ограничивающим фактором применения многоуровневых преобразователей частоты, которые из экономических соображений было рационально применять в высоковольтных схемах. С развитием производства полупроводников стоимость на силовые модули снизилась, в то же время активно внедряются новые типы электромеханических преобразователей, в которых эффективное использование активных материалов возможно только в многофазных схемах. Таким образом, проблема внедрения высоковольтных систем для мощностей от одного мегаватта и выше далеко не однозначна. Так, западные производители, такие как SMS DEMAG и Daneili, сходятся во мнении, что при напряжении 3,3 кВ силовое оборудование используется рациональнее по удельной мощности. Однако в данном случае речь идет о стационарной установке электротехнического оборудования для металлургического применения [4]. В условиях эксплуатации на буровой установке использование высоковольтного электрооборудования имеет недостатки, поскольку снижается эффективность электромеханического преобразователя (изоляция материалов занимают относительно большую долю паза статора электрической машины), что критично в автономных энергосистемах, а также по причине безопасного обслуживания электрооборудования передвижной установки.

Напротив, использование многоуровневых преобразователей в качестве приводов главных механизмов буровой установки является оптимальным с точки зрения снижения тепловых потерь. В преобразователях такого типа может быть увеличено количество фаз для деления мощности, что способствует повышению надежности систем электропривода в некоторых применениях.

При проектировании новых систем электропривода для главных механизмов буровой установки к выбору электротехнического оборудования заказчик подходит, исходя из ценового критерия,

что препятствует импортозамещению. Анализируя рынок преобразователей частоты, заказчик зачастую оперирует инвестиционными затратами на внедрение преобразователя частоты, при этом эксплуатационные затраты редко учитываются [5]. Здесь преобразователи на основе многоуровневых силовых схем обладают рядом преимуществ, которые обусловлены меньшими коммутационными потерями – в 2 раза – относительно классических двухуровневых схем при работе на одной и той же несущей частоте. Помимо этого, многоуровневые преобразователи частоты позволяют исключить капитальные затраты на дополнительное оборудование для снижения коммутационных перенапряжений на обмотках статора двигателя, что, в свою очередь, повышает надежность электромеханического преобразователя.

В связи с отсутствием возможности проанализировать стоимостные показатели многоуровневых преобразователей частоты, выполненных на напряжение до 1 кВ, поскольку крупносерийные статические преобразователи частоты изготавливаются на базе двухуровневых топологий, рационально воспользоваться ценообразованием преобразователей частоты, выполненных на базе традиционных схем. Характер и тенденции зависимостей ценообразования многоуровневых и двухуровневых силовых преобразователей значительно не отличаются.

На рис. 1 представлены удельные цены (стоимость относительно номинальной мощности) преобразователей частоты. Из представленных зависимостей видно, что удельная стоимость мало-мощных преобразователей имеет сложную нелинейную зависимость и изменяется при увеличении номинальной мощности. Такой характер тренда имеет по причине высокой стоимости микропроцессорной системы управления относительно силовых ключей на низкую мощность. Стоимость микропроцессорной системы управления не зависит от выходной мощности преобразователя, также существенного влияния не оказывает номинальный ток, поэтому с ростом установленной мощности удельная стоимость преобразователя снижается [6].

Преобразователи на базе многоуровневых схем и на базе традиционных схем включают в свою топологию аналогичные компоненты, к которым относятся выпрямитель, электролитический конденсатор, фильтры, микропроцессорную систему управления и др. [7]. Исходя из этого, вид тренда удельной стоимости многоуровневого преобразователя будет иметь тот же вид зависимостей, представленных на рис. 1. Эти данные можно использовать на этапе выбора рациональной стоимости силовой схемы многоуровневого преобразователя частоты.

Для выбора топологии преобразователя удобно воспользоваться критерием оценки, исходя из

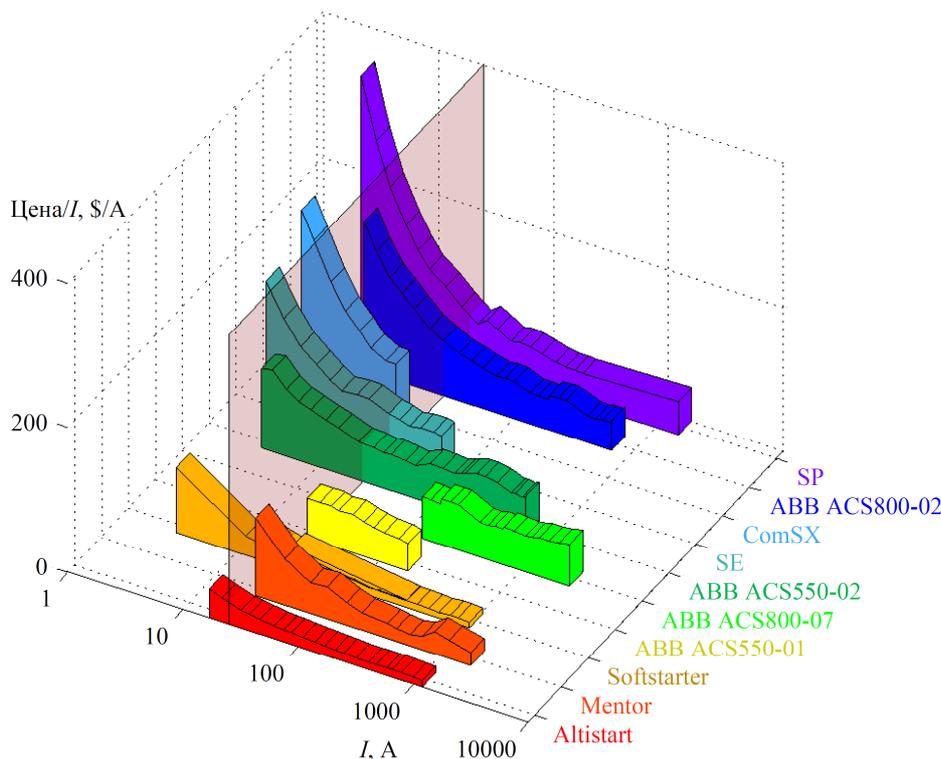


Рис. 1. Зависимость удельных цен на полупроводниковые преобразователи от тока для преобразователей частоты типов: Altistart, Mentor, Softstarter, ACS550-01, ACS800-07, ACS550-02, SE, ComSX, ACS800-02, UnidriveSP

минимальных капитальных затрат на монтируемое оборудование при сохранении величины электрических потерь, которые в трехуровневых схемах оказываются ниже:

$$q_3 = \frac{C(X)}{M} = \frac{C(F_B^0, F_A^0, F^0, \frac{D_p^0}{D_c}, \alpha^0, f)}{M}, \quad (1)$$

где $C(X)$ – затраты на комплекс «Полупроводниковый преобразователь – двигатель» в функции вектора решений X , при этом электромагнитные нагрузки F_B^0, F_A^0, F^0 и параметры электрической машины $\frac{D_p^0}{D_c}, \alpha^0$ фиксировались, а варьируемым параметром принималось количество фаз силовых цепей полупроводникового преобразователя и двигателя f , при этом f принадлежало области $F = \{f: 0 \leq f \leq \infty\}$; M – величина номинального электромагнитного момента двигателя.

На основании регрессивного анализа данных, которые представлены на рис. 1, с учетом обратной пропорциональной зависимости фазного тока к количеству фаз была рассчитана зависимость стоимости преобразователя от количества фаз:

$$C(X)/I(I_n) = A_{15} \cdot I_n^5 + A_{14} \cdot I_n^4 + A_{13} \cdot I_n^3 + A_{12} \cdot I_n^2 + A_{11} \cdot I_n + A_{10}, \quad (2)$$

где $A_{10}, A_{11}, \dots, A_{15}$ – коэффициенты, определяемые на основании стоимостных данных на полупроводниковые преобразователи и уточненные для трехуровневой конфигурации схемы силовых цепей, I_n – переменная, учитывающая изменение

номинального тока для разных габаритных мощностей полупроводникового преобразователя.

Вопрос оптимизации стоимости многоуровневых силовых схем решался численными методами. Для установленной мощности преобразователя был использован метод одномерного поиска наилучшего решения. Понятно, что результаты не будут отличаться от аналогичной задачи для двухуровневого преобразователя.

Зависимость критерия q_3 (КПД от количества фаз силовой части и мощности установки) представлена на рис. 2. На тренде видно, что для трехфазных схем малой мощности критерий принимал наименьшее значение. Это связано с дроблением фаз силовых цепей, которое приводит к удорожанию полупроводниковых силовых сборок комплектного преобразователя [8]. Напротив, для трехфазных схем большой мощности значение критерия увеличивается. Увеличение количества фаз электропривода снижает значение критерия q_3 , поскольку преобразователи частоты большой мощности имеют модульную компоновку. Каждая фаза такого преобразователя может включать от двух и более модулей, что приводит к разбросу параметров и необходимости снижения номинального тока на 5–10%. Благодаря увеличению фазности силовых цепей преобразователя модули гальванически развязываются между собой, при этом коэффициент разброса параметров принимается равным 1.

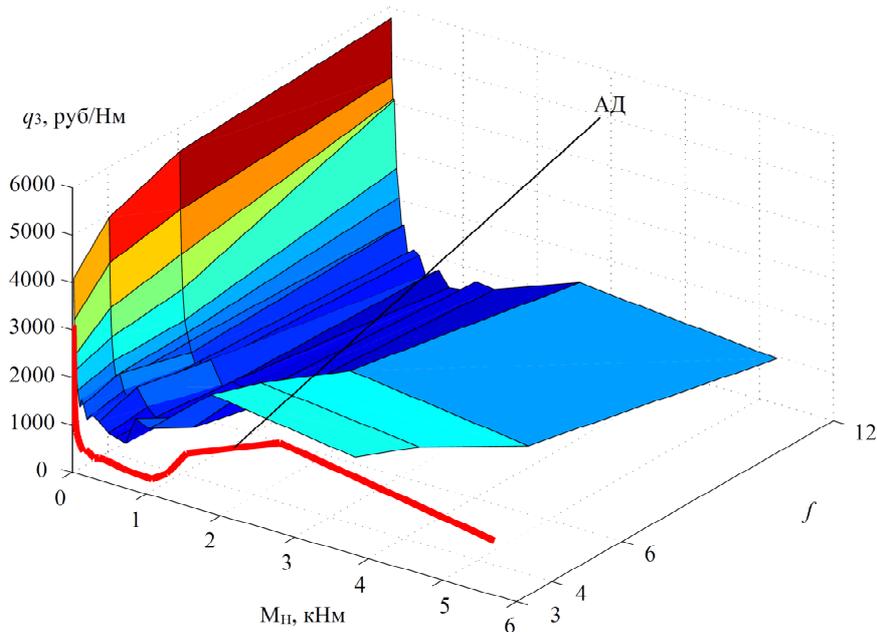


Рис. 2. Зависимость критерия $q_3 = C(X)/M$ от номинального момента и количества фаз

Оптимизация силовых цепей с точки зрения электрических потерь может быть выполнена функцией с учетом уточнения предложенного критерия на предыдущем этапе:

$$q_3 = \frac{\Delta P(X)}{M} = \frac{\Delta P(F_B^0, F_A^0, F^0, \frac{D_p^0}{D_c}, \alpha^0, f)}{M}, \quad (3)$$

где ΔP – величина, пропорциональная суммарным электрическим потерям; $F_B^0, F_A^0, F^0, \frac{D_p^0}{D_c}, \alpha^0$ фиксируются, а f варьируется и принадлежит области допустимых значений $F = \{f: 0 \leq f \leq \infty\}$; M – величина номинального электромагнитного момента двигателя.

Особенностью работы системы управления многоуровневого преобразователя являются большее количество степеней независимых управляющих воздействий. Это связано с увеличением фазности как электромеханического преобразователя, так и автономного инвертора напряжения. От выбора способа модуляции будут зависеть энергетические показатели преобразователя. На рис. 3 даны результаты расчета критерия оптимизации по электрическим потерям, при этом электрические потери полупроводникового преобразователя рассчитывались по рекомендациям [2].

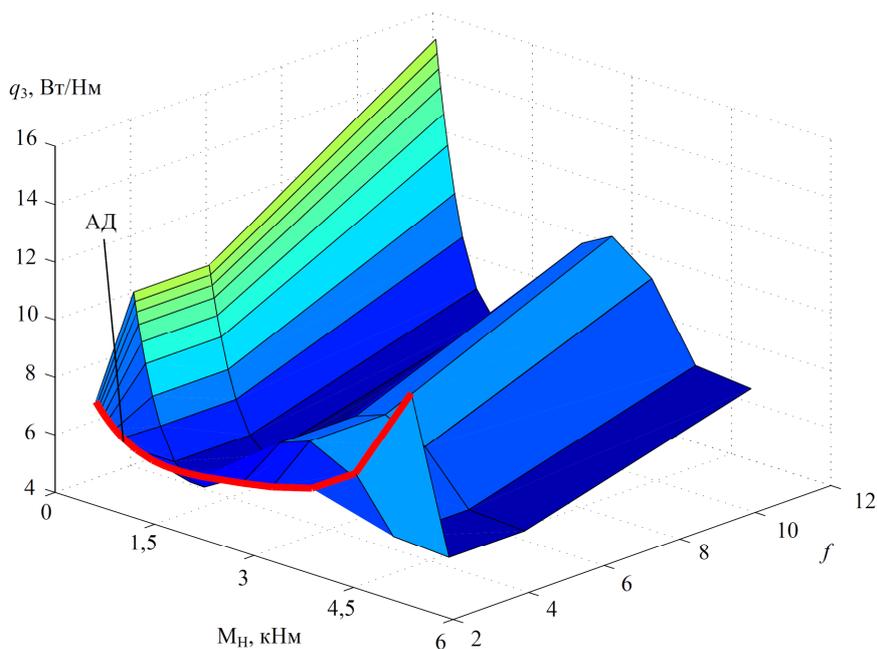


Рис. 3. Зависимость критерия $q_3 = \Delta P(X)/M$ от номинального момента (мощности) и количества фаз f

Из диаграмм критерия q_3 видно, что эффективность использования многоуровневых схем возрастает при фазности $f=5, 6$ и мощности от 700 кВт.

Анализ зависимости q_3 показал, что наиболее эффективное использование трехуровневого преобразователя при мощностях $P > 700$ кВт ($M_{н} > 5$ кНм) регистрируется в точках $f=5, 6$. Дальнейшее увеличение числа фаз частотного преобразователя и электромеханического преобразователя увеличивает удельные потери, поскольку увеличение фаз возможно лишь за счет эквивалентного увеличения транзисторных ключей.

В действительности полученная зависимость (см. рис. 3) может быть выполнена более точно, поскольку вычисления производились при условии несущей частоты не более 0,9 кГц. На самом деле несущая частота для преобразователей, выполненных на напряжение до 1 кВ, находится в диапазоне от 2 до 8 кГц. Ценность полученных результатов заключается в наличии экстремума, а именно наличия минимума электрических потерь при $f > 3$. Аналогичный расчет для преобразователей частоты, выполненных по традиционной схеме силовых цепей, показал, что минимум электрических потерь всегда выполняется при трехфазной схеме.

Существует еще один способ расчета оптимального количества фаз полупроводникового преобразователя по критерию надежности. Здесь есть два пути решения поставленной задачи. Первый путь – самый простой и подразумевает собой 100%-ное резервирование либо завышение установленной мощности преобразователя. Недостатком данного метода являются завышенные капитальные затраты, которые могут достигать двукратного увеличения стоимости [9].

Альтернативный путь оптимизации выполняется на основании учета дополнительных возможностей многофазных схем. Многофазная схема преобразователя позволяет сохранить работоспособность электромеханического преобразователя в случае выхода из строя одной из фаз, однако номинальный крутящий момент будет снижен по условиям нагрева электротехнической установки. С другой стороны, в отказавшей фазной обмотке двигателя потери не выделяются, а следовательно, по условиям нагрева ток может быть увеличен. Увеличение количества фаз электромеханического преобразователя и преобразователя частоты дроблением позволяет обеспечить большую работоспособность электропривода при отказе фазной обмотки. Однако это ведет к увеличению установленной мощности системы электропривода, а также увеличивает стоимость капитальных затрат. В результате вопрос оптимизации количества фаз силовых цепей преобразователя частоты по критерию надежности можно рассмотреть как эквивалентную кратную систему резервирования при условии ограничения нагрузок в электроприводе.

Зависимости допустимых значений момента и тока электромеханического преобразователя от общего числа фаз f при изменении числа отказавших фаз f' представлены в виде поверхностей на рис. 4. Было выявлено, что наиболее эффективное использование электропривода при аварийных режимах (отказ одной из фаз) выполняется при количестве фаз силовых цепей $f > 6$. Вероятность выхода из строя также может быть снижена с 0,1 до 0,05 обратно пропорционально изменению количества фаз. Для учета экономического критерия предлагаемая методика должна быть интегрирована в общую методику повышения надежности показателей системы, разработанную в [10].

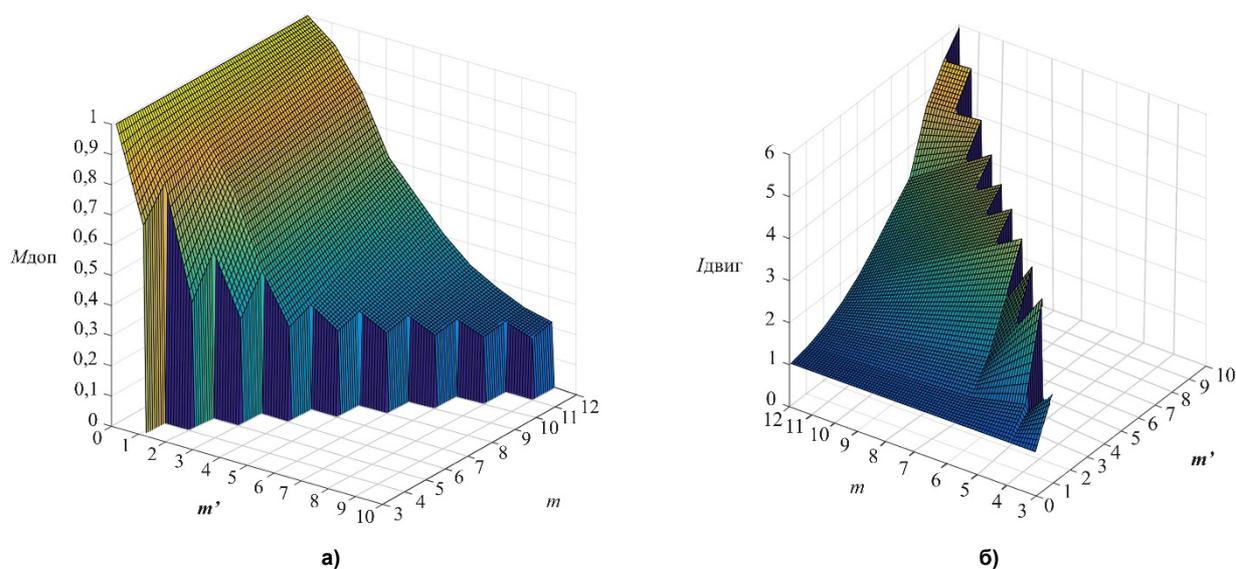


Рис. 4. Зависимости допустимого момента (а), тока (б) от общего числа фаз f и от количества отказавших фаз f'



Рис. 5. Преобразователь частоты модульного исполнения МТ-1000 производства ГК «Приводная техника» (г. Челябинск)

Выводы

Преобразователи частоты, выполняемые на напряжение ниже 1 кВ и мощность до 1 МВт для нефтегазовой отрасли, имеют модульное исполнение. Каждый узел преобразователя частоты, например, выпрямитель и инвертор, является отдельной секцией и содержит несколько подключенных параллельно модулей. Это позволяет масштабировать мощность преобразователей одной линейки. При модульном исполнении преобразователей и при условии многофазной обмотки двигателя возможно выполнение подключения каждого отдельного модуля с гальванической развязкой между собой к отдельной фазе двигателя, что позволяет увеличить надежность системы электропривода без дополнительных вложений на капитальные затраты.

Результаты теоретических исследований и практических экспериментов подтверждают экономическое обоснование применения многоуровневых преобразователей частоты, выполняемых на напряжение до 1 кВ. Немаловажное влияние на это оказало развитие и применение современных тех-

нологий при производстве электронной компонентной базы. Помимо этого, при переходе к многоуровневым топологиям преобразователей частоты удастся повысить энергоэффективность системы за счет методов модуляции.

Реализация рекомендаций и выводов

В настоящее время группа компаний «Приводная техника» начала выпускать линейку приводов под брендовой маркой «МОМЕНТУМ» серии МТ-1000/ МТ-2000, реализованных на базе трехуровневых инверторов многофазного модульного исполнения на уровень напряжения до 1 кВ (рис. 5) в диапазоне мощностей от 500 до 2500 кВт, при этом удалось снизить электрические потери до 1,4 % в долях от номинала.

В 2016 г. рассматриваемый привод прошел успешные испытания на одном из объектов буровых установок ПАО «НК «Роснефть».

Южно-Уральский государственный университет выражает благодарность Министерству образования и науки Российской Федерации за финансовую поддержку (грант № 13.9662.2017 / ВР).

Литература

1. ABB industrial drives ACS880 single drives Catalog. – 2015. – 55 p.
2. Vinogradov, A.B. Control of a multilevel frequency converter of a power-efficient electric drive / A.B. Vinogradov, A.A. Korotkov // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88, no. 4. – P. 212–218. DOI: 10.3103/S1068371217040149
3. Применение аппарата нечеткой логики для улучшения динамических характеристик гибридных фильтров высших гармоник / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, М.И. Смирнов, Р.П. Гринберг // Электричество. – 2007. – № 1. – С. 23–31.
4. Шавелкин, А.А. Анализ возможностей реализации несимметричных каскадных многоуровневых преобразователей частоты / А.А. Шавелкин // Электротехника. – 2008. – № 9. – С. 39а–45.
5. Садиков, Д.Г. Разработка оптимизированного алгоритма управления каскадным многоуровневым преобразователем частоты / Д.Г. Садиков, В.Г. Титов // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, Пермь, 03–07 октября 2016 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2016. – С. 292–296.

6. Tu, Q. *Reduced Switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters* / Q. Tu, Z. Xu, L. Xu // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2011. – Vol. 26, no. 3. – P. 2009–2017. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2115258

7. *Multilevel inverter topologies with reduced device count: A review* / K.K. Gupta, A. Ranjan, P. Bhatnagar et al. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2016. – Vol. 31, no. 1. – P. 135–151. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2405012

8. *Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters* / K. Ilves, A. Antonopoulos, S. Norrga, H. Nee // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2012. – Vol. 27, no. 1. – P. 57–68. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2159809

9. *Recently Developed Reduced Switch Multilevel Inverter for Renewable Energy Integration and Drives Application: Topologies, Comprehensive Analysis and Comparative Evaluation* / P.R. Bana, K.P. Panda, R.T. Naayagi et al. // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 54888–54909. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2913447

10. *Повышение надежности полупроводниковых преобразователей и электроприводов объектов кислородно-конверторного производства* / Ю.С. Усынин, А.М. Журавлев, И.А. Белых, Е.С. Чупин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 66–71. DOI: 10.14529/power160209

Коржов Антон Вениаминович, д-р техн. наук, профессор кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; korzhovav@susu.ru.

Хохлов Юрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; khokhlovii@susu.ru.

Григорьев Максим Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Цифровая индустрия», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; grigorevma@susu.ru.

Хрюкин Дмитрий Юрьевич, аспирант, кафедра автоматизированного электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; dmitry.khriukin@yandex.ru.

Кушнарев Виктор Александрович, студент, кафедра автоматизированного электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; a55538a@yandex.ru.

Поступила в редакцию 29 ноября 2021 г.

DOI: 10.14529/power210411

IMPROVING POWER AND RELIABILITY OF MULTILEVEL FREQUENCY CONVERTERS FOR DRILLING RIGS

A.V. Korzhov, korzhovav@susu.ru

Yu. I. Khokhlov, khokhlovii@susu.ru,

M.A. Grigorev, grigorevma@susu.ru

D.Yu. Khryukin, dmitry.khriukin@yandex.ru

V.A. Kushnarev, a55538a@yandex.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Modern electric drives used in the oil and gas sector are made based on two-level power circuits for voltages up to 1 kV and have a modular cabinet design. The paper presents improvements based on the optimization of the number of modular frequency converters aimed at insuring smooth operation of critical oil and gas applications. Using the method of numerical analysis, the criteria for optimizing the number of phases of the power circuits of the converter in terms of cost, electrical losses and reliability were derived, based on the data on the cost of two-level frequency converters. An economic justification for reducing capital and operating costs when using multilevel frequency converters is given. It is revealed that the proposed optimization methods allow reducing electrical losses due to the reduction of overvoltages on the electromechanical converter, as well those in the DC link. The reliability increase is determined by the operability of the electromechanical converter in the event of a failure of one of its phase winding, taking into account the decrease in the installed power. The results of the introduction of multilevel frequency converters “MOMENTUM” of the MT-1000/MT-2000 series of the Scientific and Technical Center “Privodnaya Tekhnika” LLC are presented.

Keywords: multilevel converters, reliability, electric losses, drilling rig.

References

1. *ABB industrial drives ACS880 single drives Catalog*, 2015. 55 p.
2. Vinogradov A.B., Korotkov A.A. Control of a multilevel frequency converter of a power-efficient electric drive. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 4, pp. 212–218. DOI: 10.3103/S1068371217040149
3. Rozanov Yu.K., Ryabchitskiy M.V., Smirnov M.I., Grinberg R.P. [Application of Fuzzy Logic Instrument for Improving the Dynamic Characteristics of Hybrid Filters of Higher Harmonics]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 1, pp. 23–31. (in Russ.)
4. Shavelkin A.A. [Analysis of the possibilities of realizing asymmetric cascade multilevel frequency converters]. *Russian Electrical Engineering*, 2008, no. 9, pp. 39a–45. (in Russ.)
5. Sadikov D.G., Titov V.G. [Development of an optimized control algorithm for a cascade multilevel frequency converter]. *Trudy IX mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016, Perm', 03–07 oktyabrya 2016 goda*. [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on the Automated Electric Drive AEP-2016, Perm, 03–07 October 2016]. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2016, pp. 292–296. (in Russ.)
6. Tu Q., Xu Z., Xu L. Reduced Switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26 no. 3, pp. 2009–2017. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2115258
7. Gupta K.K., Ranjan A., Bhatnagar P., Sahu L.K., Jain S. Multilevel inverter topologies with reduced device count: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31 no. 1, pp. 135–151. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2405012
8. Ilves K., Antonopoulos A., Norrga S., Nee H. Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 57–68. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2159809
9. Bana P.R., Panda K.P., Naayagi R.T., Siano P., Panda G. Recently Developed Reduced Switch Multilevel Inverter for Renewable Energy Integration and Drives Application: Topologies, Comprehensive Analysis and Comparative Evaluation, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 54888–54909. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2913447
10. Usynin Yu.S., Zhuravlev A.M., Belykh I.A., Chupin E.S. Improvement of Reliability of Semiconductor Converters and Electric Drives of Oxygen-Steelmaking Facilities. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 66–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160209

Received 29 November 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Улучшение энергетических и повышение надёжных показателей электроприводов буровых установок / А.В. Коржов, Ю.И. Хохлов, М.А. Григорьев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 94–101. DOI: 10.14529/power210411

FOR CITATION

Korzhev A.V., Khokhlov Yu. I., Grigorev M.A., Khryukin D.Yu., Kushnarev V.A. Improving Power and Reliability of Multilevel Frequency Converters for Drilling Rigs. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 94–101. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210411