

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

---

---

УДК 621.313

**Александр Евгеньевич Савенко**

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Россия, Республика Крым, Керчь, e-mail: savenko-70@mail.ru

**Павел Станиславович Савенко**

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Россия, Республика Крым, Керчь, e-mail: pashasavenko@gmail.com

### Особенности работы кранового группового электропривода с частотным управлением на морском судне

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Одной из важнейших задач повышения эффективности и надежности современных морских судов является исследование работы электрических приводов с частотным управлением. Существует достаточное количество научных работ, в которых проводится анализ и исследования на тему частотного управления электрическими приводами. Проблемы возникают при эксплуатации морских судов специального назначения, оснащенных мощным краном грузоподъемностью 250 тонн. Экипаж судна в условиях работы в открытом море не может полноценно эксплуатировать грузовой кран на полной скорости, так как он неожиданно отключается защитой и возникает аварийная ситуация. В связи с этим актуальным является совершенствование использования мощных групповых электроприводов на морских судах.

**Материалы и методы.** С применением метода пассивного эксперимента проведено исследование работы шести электродвигателей мощностью по 400 кВт, которые приводят в движение лебедку главного гака крана. За работой частотного преобразователя и многоканального осциллографа осуществлялся постоянный мониторинг. Использование штатных функций системы управления частотного преобразователя позволяет контролировать и получать осциллограммы одновременно шести параметров: моментов, активных мощности и оборотов двигателей, полного тока лебедки. Необходимые корректировки и настройки системы управления частотными преобразователями произведены путем изменения параметризации карты обработки сигнала энкодера.

**Результаты.** Рассмотрена конструкция постаментного крана грузоподъемностью 250 тонн на трубоукладочном судне Seven Vega. Получены экспериментальные осциллограммы, характеризующие работу лебедки главного гака крана, при этом зафиксирован момент трипа (выбивания по перегрузке) на максимальной скорости одного из шести приводных электродвигателей. Установлено, что срабатывание защиты приводит к невозможности продолжения подъема или спуска груза. Проведенные

исследования показали, что для применяемых в групповом крановом электрическом приводе энкодеров необходимо использовать закон расчета скорости вращения по полной длительности периода импульсов одного канала. После изменения параметризации карты обработки сигнала энкодера, обеспечивающей расчет скорости вращения каждого из шести электродвигателей, проведены длительные испытания, которые показали исправную работу лебедки главного гака крана на максимальных скоростях.

**Выводы.** Результаты проведенных исследований позволяют обеспечить качественную работу группового кранового электрического привода с частотным управлением. Установлено, что при выявлении несимметрии длительности импульсов в работе оптических энкодеров необходимо изменить метод расчета скорости частотным преобразователем в целях использования полной длительности периода импульсов одного канала, а не разницы между фронтами или спадами импульсов четырех каналов. Опыт проведенных исследований и ремонтно-наладочных работ может быть использован в различных электротехнических комплексах, в которых применяются групповые электрические приводы с частотными преобразователями Siemens.

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс, электрический привод, частотный преобразователь, осциллограмма, грузовой кран, энкодер, импульс

#### Alexander Evgenyevich Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Equipment of Ships and Production Automation Department, Russia, Republic of Crimea, Kerch, e-mail: savenko-70@mail.ru

#### Pavel Stanislavovich Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Postgraduate Student of Electrical Equipment of Ships and Production Automation Department, Russia, Republic of Crimea, Kerch, e-mail: pashasavenko@gmail.com

## Operation of crane group electric drive with frequency control on a marine vessel

### Abstract

**Background.** One of the most important tasks to increase efficiency and reliability of modern sea vessels is the study of the operation of electric drives with frequency control. There is a sufficient number of scientific studies in which analysis and research is carried out on the topic of frequency control of electric drives. Problems occur when operating special-purpose sea vessels equipped with a powerful crane with a lifting capacity of 250 tons. The ship crew when working in the open sea, cannot fully operate the cargo crane at full speed, since it is suddenly switched off by the protection and an emergency occurs. In this regard, it is relevant to improve the use of powerful group electric drives on sea vessels.

**Materials and methods.** The authors have used a passive experiment method to study the operation of six electric motors with a power of 400 kW, which drive the winch of the crane main hook. The operation of the frequency converter and multichannel oscilloscope has been constantly monitored. Using the standard functions of the frequency converter control system allows you to monitor and obtain oscillograms of six parameters simultaneously: motor torques, active motor powers and engine rpm speed, total winch current. The necessary adjustments and settings of the frequency converter control system are carried out by changing the parameterization of the encoder signal processing card.

**Results.** The design of a pedestal crane with a lifting capacity of 250 tons on the pipe-laying vessel Seven Vega is considered. Experimental oscillograms have been obtained characterizing the operation of the crane main hook winch. The moment of trip (knockout due to overload) has been recorded at the maximum speed of one of the six drive electric motors. It has been established that such protection makes it impossible to continue lifting or lowering the load. The conducted studies have shown that for encoders used in a group crane electric drive, it is necessary to use the law of calculation of the rotation speed using the full duration of the pulse period of one channel. After changing the parameterization of the encoder signal processing map, which provides calculation of the rotation speed of each of the six electric motors, long-term tests have been carried out. The tests results have shown the proper operation of the crane main hook winch at maximum speeds.

**Conclusions.** The results of the conducted research make it possible to ensure high-quality operation of a group crane electric drive with frequency control. As a result of the study, it is established that when asymmetry of pulse duration is detected in the operation of optical encoders, it is necessary to change the speed calculation method of the frequency converter to use the full duration of the pulse period of one channel, and

not the difference between the fronts or drops of the pulses of four channels. The experience of the conducted research and repair and adjustment work can be used in various electrical complexes that use group electric drives with Siemens frequency converters.

**Key words:** electric power system, electric drive, frequency converter, oscillogram, cargo crane, encoder, pulse

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2024.2.059-069

**Введение.** Для выполнения грузовых операций на морских судах устанавливаются различные грузоподъемные механизмы, наиболее эффективными из которых являются грузовые краны [1, 2]. В зависимости от своего назначения, грузовые краны могут иметь различную конструкцию и грузоподъемность [3]. При этом количество электрических приводов, установленных на грузовых кранах, также может быть различным [4, 5]. Как правило, кран имеет электропривод механизма подъема груза, электропривод механизма изменения вылета стрелы, электропривод механизма поворота крана и может иметь электропривод механизма передвижения самого крана. Фирма Huisman (Голландия) проектирует, изготавливает и устанавливает уникальные грузовые краны на морские суда специального назначения [6, 7, 8]. Одним из таких судов является суперсовременное трубоукладочное судно *Seven Vega*, построенное в 2020 году, на котором установлен грузовой электрический главный кран Huisman грузоподъемностью 250 тонн.

Судно *Seven Vega* проектировалось и строилось с учетом последних достижений в области мирового морского судостроения для прокладки трубопроводов под водой [9]. Однако экипаж вынужден ремонтировать одни и те же узлы и механизмы [10, 11]. По информации с судна, 80 % поломок периодически повторяются. Как правило, после ремонта через 2–3 месяца, максимум через полгода неисправности возникают снова, несмотря на модификацию слабых мест. Обычно после ремонта и изменения конструкций на судне ресурс увеличивается с 2 до 4 месяцев. Многие узлы с неправильным расчетом прочности просто выламываются, после чего заказывается на верфи инженерный перерасчет. Инженеры производят перерасчет, признают ошибки при проектировании и вносят предложения по усилению механической прочности конструкции. После этого все изменения проходят согласования с Морским Регистром DNV. Но даже после мо-

дернизации некоторых механических узлов через полгода поломки возникают снова. Отмечены случаи, когда обоймы подшипников раскатываются так, что ролики вываливаются. Описанные ситуации возникают циклически в основном по механической части. Электротехнический комплекс отлажен и работает достаточно стабильно, но и в нем возникают проблемные ситуации.

На каждом оборудовании установлен свой блок ввода/вывода (*remote input/output – RIO*) Siemens и организована сеть с топологией кольца от центральных контроллеров через все оборудование. В результате при обрыве кабеля или выходе из строя коммутатора все продолжает работать, но при этом теряется резервирование. Рассмотрим ситуацию потери связи с коммутатором в блоке под водой, который зажимает и удерживает трубу. Очевидно, что доступ в место повреждения отсутствует. Если следовать топологии Siemens, то к коммутатору подсоединяются два оптических кабеля, образуя кольцевую схему подключения, в случае обрыва коммутатор изолирует один порт и разрывает кольцо. Но этот Scalence x204 умеет так разрывать только оптический порт. К коммутатору блока фиксации трубы подключен один кабель оптический, а другой – витая пара, которая только через четыре устройства конвертируется в оптический сигнал таким же коммутатором. Согласно инструкции, подключиться удаленно к коммутатору можно только через оптический порт. Но коммутатор его блокирует и возможность такого подключения отсутствует. Поднять конструкцию также невозможно: труба зажата, а разжать ее не получается, так как на этом устройстве потеряна связь с PLC. Для восстановления работоспособности необходимо резать трубу, крепить сваркой к ней оголовок, цеплять за лебедку и поднимать. Но на это требуется до 20 часов, чтобы достать ящик, найти отвалившийся коннектор, переобжать и перегрузить коммутатор.

После сообщения о происшествии производителю этого зажима выяснилось,

что их IT-инженер не знал, что зайти удаленно на этот тип коммутаторов можно только по оптическому порту.

**Материалы и методы.** Кран на пьедестале грузоподъемностью 250 тонн, разработанный для фирмы Royal IHC, предназначен для подъема грузов в море. Он может справиться с большим спектром задач. Кран стационарно установлен на корпусе судна.

Кран (рис. 1) имеет три подъемные системы для выполнения основных задач по подъему: два грузоподъемных устройства (поддерживающие лебедки) для помощи в стабилизации и позиционировании груза; систему поворота, обеспечивающую поворотное движение крана. Энергосистемы обеспечивают мощность, необходимую для работы. Кроме того, кран имеет несколько систем безопасности, способствующих безопасной эксплуатации крана. Кран управляется системой SCADA и PLC.

Лебедка главного гака крана Main Hoist – самая большая подъемная система. Ее можно использовать для глубоководных подъемов с морского дна. Главная лебедка также имеет активную компенсацию качки, чтобы минимизировать вертикальное перемещение груза в результате движения судна из-за волнового движения. Эта лебедка также оснащена режимом постоянно-

го натяжения (Constant Tension) для подъема с морского дна, автоматическим намотчиком, который направляет намотку троса на барабан. Барабан приводится в движение шестью комбинациями электродвигателя и редуктора (рис. 2), установленными на ведомой стороне лебедки. Шестерни на выходном валу двигателя входят в зацепление с зубчатым внутренним кольцом поворотного подшипника, приводя в движение барабан. Износ шестерен предотвращается системой смазки. Масло в каждом редукторе охлаждается воздушным маслоохладителем. Лебедка имеет три независимые тормозные системы:

1) динамическое торможение за счет рекуперативного режима электродвигателей;

2) суппортные тормоза, используемые в качестве стояночного тормоза (статического) и динамического тормоза в случае отключения системы или при отключении электроэнергии;

3) независимый суппортный тормоз для ручной системы защиты от перегрузки (MOPS) на двигателе.

Система малого гака Whip Hoist используется для выполнения бортовых и внешних подъемных операций, работает быстрее, чем лебедка главного гака.

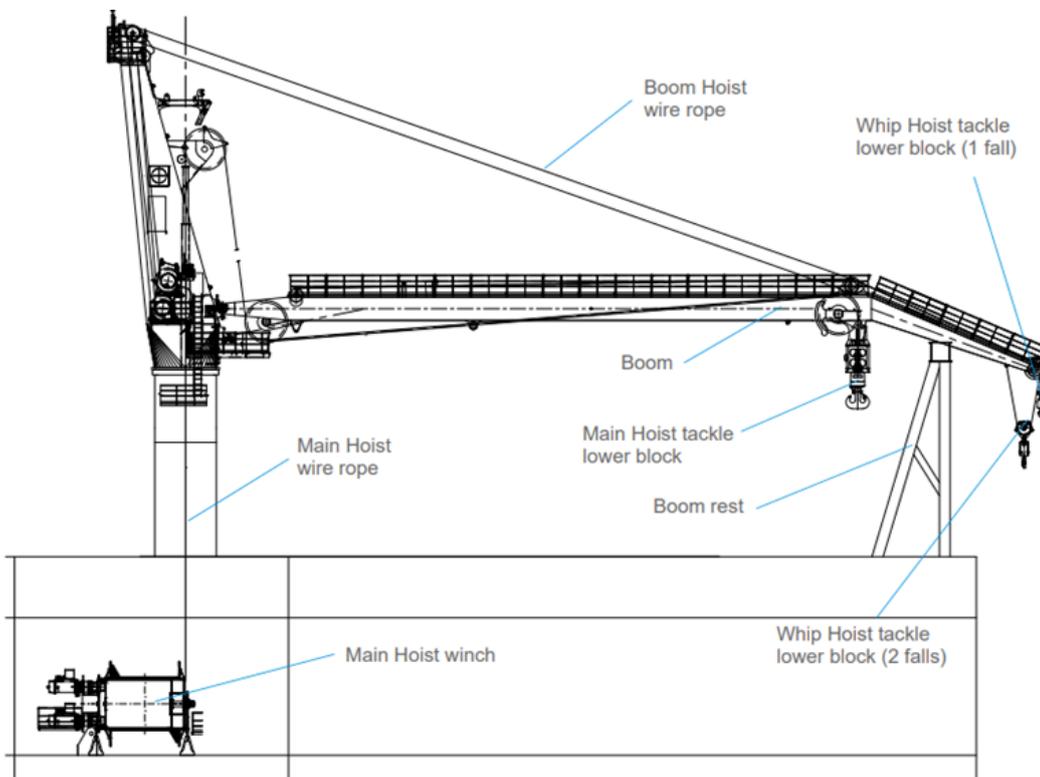


Рис. 1. Вид сбоку основных частей крана

Лебедка стрелы Boom Hoist используется для опускания и подъема стрелы для позиционирования грузов или самой стрелы.

Грузоподъемные устройства Load Tuggers используются для стабилизации груза в горизонтальной плоскости. Они также используются для небольшой регулировки положения груза в горизонтальной плоскости. Грузовые буксиры никогда не следует использовать для подъема грузов или персонала. Грузозахватные устройства имеют режим постоянного натяжения для автоматической стабилизации нагрузки.

Поворотная система обеспечивает поворотное движение, то есть вращение крановой башни относительно постаментов. Энергия для питания потребителей от постаментов к крану передается через кабели. В этом кране нет колец, просто по периметру внутри постаментов уложены кабели. Кран может поворачиваться на 225° как по часовой, так и против часовой стрелки. Поворот крана осуществляется четырьмя поворотными приводами.

Кран полностью оснащен электрическим приводом и использует частотно-регулируемые приводы для управления электродвигателями.

Распределение напряжения 930 В постоянного тока подает питание на основные электродвигатели, которые управляют всеми движениями крана.

Судно имеет два источника питания мощностью 1,5 МВт, 6,6 кВ переменного тока. Каждый из них питает независимую шину. Напряжение от судовых источников преобразуется в 690 В переменного тока с помощью трансформаторов. Это уменьшает частотные гармоники и таким образом повышает эффективность двигателей. Напряжение 690 В переменного тока, полученное от трансформаторов, преобразуется в напряжение 930 В постоянного тока с помощью двух 12-пульсных выпрямителей и затем подается на шину. Шина питает несколько преобразователей частоты (ПЧ). ПЧ преобразуют напряжение 930 В постоянного тока в напряжение 690 В переменного тока с частотным управлением, которое затем используется для управления электродвигателями. Каждый ПЧ управляет одним электродвигателем, за исключением приводов поворота, где каждый ПЧ управляет двумя электродвигателями.

Намоточное устройство главной лебедки приводится в действие отдельной гидравлической силовой установкой (HPU). Она также приводит в действие тормоза главной лебедки крана.

Кран управляется системой SCADA PLC. ПЛК получает оперативную информацию от датчиков и исполнительных механизмов на кране, таких как датчики для измерения нагрузки, датчики скорости, кулачковые переключатели с редуктором и переключатели провисания троса на лебедках.

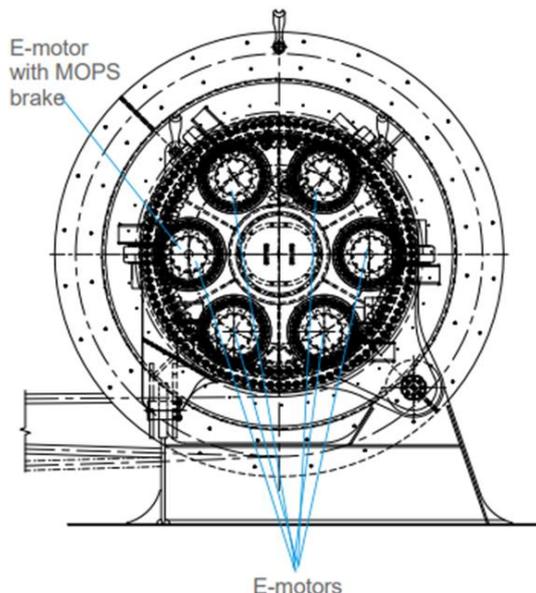


Рис. 2. Конструкция лебедки главного гака крана

Управление краном осуществляется с кресла оператора в кабине крана. Кресло оператора имеет две консоли. На консолях кресел расположены основные органы управления краном. Шкаф управления кабиной содержит общие органы управления, такие как управление стеклоочистителями и управление отоплением. Информация о работе и состоянии оборудования отображается на экране SCADA в кабине крана.

Кран имеет систему аварийной остановки. Кнопки аварийной остановки установлены в нескольких стратегически важных местах. Кран оснащен автоматической системой защиты от перегрузки (AOPS), которая использует заранее заданные кривые нагрузки для конкретных ситуаций подъема. Лебедки главного гака Main Hoist и малого гака Whip Hoist оснащены системой ручной защиты от перегрузки (MOPS), которая позволяет оператору вручную освободить груз при возникновении ситуации перегрузки. MOPS обычно использу-

ется в ситуациях перегрузки, связанных с дрейфом катеров снабжения во время их подъема в сочетании с неисправной подъемной системой. Превышение скорости и ускорения лебедок защищено цифровой независимой системой защиты скорости (DISPS). Все подъемные системы также оснащены системой защиты от передвижения. Система защиты от выбега использует кулачковые переключатели с редуктором, установленные на лебедках, и бесконтактные переключатели для определения положения. Система защиты от перегрева защищает компоненты крана от повреждений из-за перегрева.

С начала работы судна экипаж не может полноценно эксплуатировать кран на полной скорости, так как известно, что лебедка главного гака может неожиданно отключиться и возникнет аварийная ситуация. Испытания проводятся без груза, когда кран не участвует в технологических операциях. Шесть электромоторов мощностью по 400 кВт приводят в движение лебедку главного гака. Для управления установлено шесть индивидуальных частотных преобразователей по 800 кВт на каждый электродвигатель. При работе крана на полной скорости защита выключает один из шести моторов на лебедке. Во время наблюдений отмечено, что электромотор номер пять примерно раз в две недели отключается на полной скорости даже с пустым гаком. С пустым гаком нагрузка составляет примерно по 30 кВт на каждом электромоторе и случается момент, когда на пятом электромоторе она достигает 600–700 кВт и частотный преобразователь выбивает по высокому току.

Замена частотного преобразователя, электромотора, энкодера, кабеля на энкодер, карты энкодера, кабеля между ПЛК и частотным преобразователем и картой энкодера, кабеля на электромотор к улучшению ситуации не привела. Также сравнивались все параметры частотных преобразователей. Для исключения потери питания на карту энкодера и на питание контроллера частотного преобразователя устанавливался аккумулятор 24 В. Однако принятые меры не увенчались успехом.

Два года, пока кран был на гарантии, в каждом порту сервисный инженер пытался найти проблему. Ну вот уже год, как гарантии нет, электромеханическая служба судна пытается устранить эту неисправ-

ность. Очевидно, что проблема серьезная и требует проведения исследований.

Основным методом в проведении исследований является проведение пассивного эксперимента. Необходимо вести постоянный мониторинг работы частотного преобразователя при помощи его штатных возможностей и многоканального осциллографа. Использование штатных функций системы управления частотного преобразователя позволяет контролировать и получать осциллограммы одновременно шести параметров. Такими параметрами могут быть моменты двигателей, активные мощности двигателей, полный ток лебедки и обороты двигателей. Таким образом, проведение первого этапа исследований позволит получить достаточное количество информации, анализ которой позволит установить возможную причину отключения электродвигателя лебедки крана. Далее можно внести необходимые корректировки в программное обеспечение и настройки системы управления частотными преобразователями, проведя изменение параметризации карты обработки сигнала энкодера. После внесения изменений необходимо продолжить мониторинг работы крана для подтверждения успешности разработанных и внедренных мер и средств.

**Результаты.** В результате исследования установлено, что электродвигатель выбивает по обратной мощности. Если гак спускается и все электромоторы находятся в режиме генерации, то пятый электродвигатель переходит в режим двигателя. Если все электромоторы работают в режиме подъема, то пятый электродвигатель примерно раз в 2–3 недели переходит в режим генерации (рекуперации).

На рис. 3 и 4 представлены осциллограммы, на которых показаны графики момента на пятом электродвигателе 2, момента на четвертом электродвигателе 5, активной мощности пятого электродвигателя 4, активной мощности четвертого электродвигателя 6, полного тока лебедки 3, оборотов пятого электродвигателя 1.

На осциллограмме в режиме 1 (рис. 3) зафиксирован скачок по моменту пятого электродвигателя на графике 2, также наблюдается увеличение активной мощности пятого электродвигателя на графике 4 и полного тока лебедки на графике 3. На осциллограмме в режиме 2 (рис. 4) зафиксирован значительный, го-

раздо больший, чем на рис. 3, скачок по моменту пятого электродвигателя на графике 2, также наблюдаются значительные

увеличения активной мощности пятого электродвигателя на графике 4 и полного тока лебедки на графике 3.

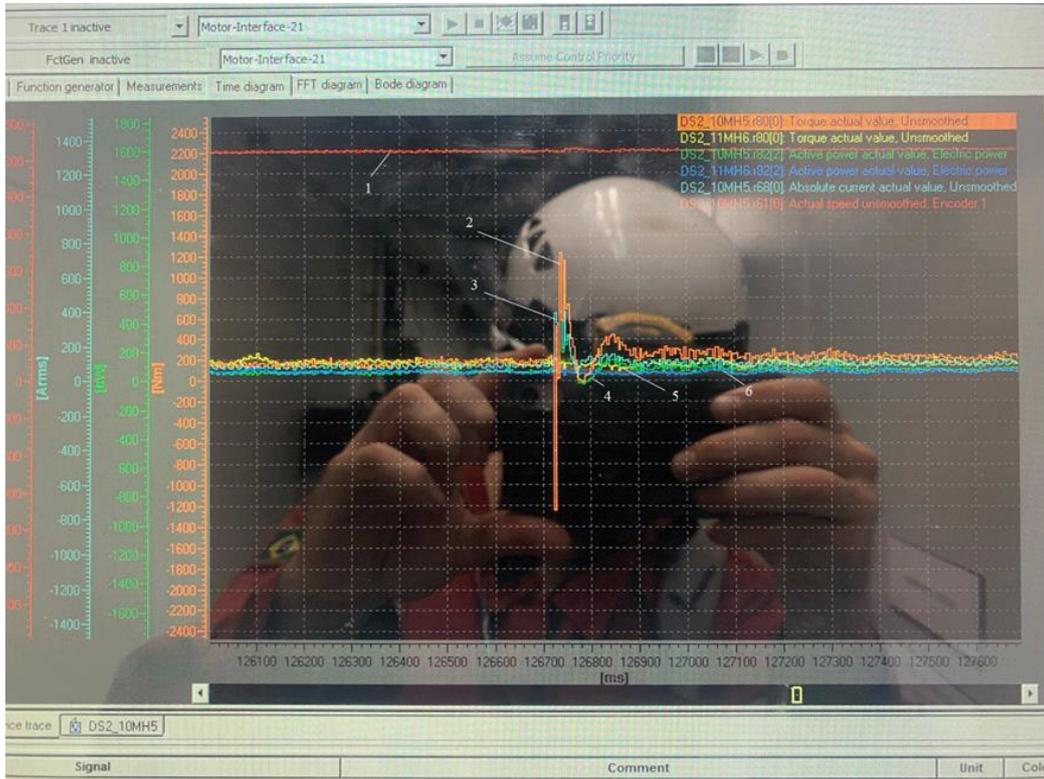


Рис. 3. Осциллограмма работы лебедки (режим 1)



Рис. 4. Осциллограмма работы лебедки (режим 2)

Но самым интересным и важным является то, что на рис. 4 график сигнала оборотов с энкодера 1 имеет провал до нуля в момент, когда начинаются скачки момента, мощности и тока. Электромотор вращается со скоростью 3100 об/мин. Так как время выборки у графиков частотного преобразователя 4 мс, то, если событие меньше, его не видно (рис. 3). А на рис. 4 как раз удалось зафиксировать, когда график оборотов электромотора 1 за 4 мс падает с 3100 об/мин до нуля, а потом возвращается обратно. Вес лебедки главного гака крана 250 тонн, поэтому ее физически невозможно остановить за 4 мс: даже если тормоза механические и все 6 моторов весом по полторы тонны рекуперируют по 600 кВт каждый, она останавливается за 1,2 секунды. В результате наблюдений за работой крана также было установлено, что если работать на оборотах до 2900 об/мин, то электромотор никогда не выбивает (это событие происходит только на 3000 об/мин и выше).

Анализ графиков на осциллограммах частотного преобразователя показывает, что электродвигатель на 2–4 мс теряет сигнал с энкодера. В это время частотный преобразователь пытается его раскрутить сильнее и повышает частоту, ток растет и

двигатель выбивает. Таким образом, основным является вопрос о причине потери сигнала с энкодера. На рис. 5 представлена осциллограмма сигналов энкодера на карте частотного преобразователя. Все сигналы на четырех каналах одинаковые (с амплитудой 23 В), ноль смещен, чтоб не перекрывались графики.

Анализ осциллограмм (рис. 5) показывает, что стабильный ровный сигнал поступает со всех 4 каналов, а с момента отключения электродвигателя и до полного его останова длительность импульсов равномерно увеличивается.

На рис. 5 изображена осциллограмма для случая, когда четыре входа осциллографа подключены к четырем выходам А, А', В, В' инкрементного энкодера. В инкрементных энкодерах два выходных сигнала. По количеству импульсов на них определяется скорость, а по сдвигу фаз – направление вращения.

Инвертированный сигнал принципиально можно не использовать. Тогда в настройках выбирается, что энкодер не двухполярный и можно использовать два канала со сдвигом на 90 градусов. Недостаток двухканальных энкодеров – длина кабеля (при длине свыше 30 метров система не работает).



Рис. 5. Сигнал энкодера на карте частотного преобразователя: график 1 – канал А энкодера; график 3 – канал В энкодера; график 2 – канал А' инверсный к каналу А; график 4 – канал В' инверсный к каналу В

Частота импульсов на электромоторе, который вращается со скоростью 3000 об/мин и на котором установлен, например, энкодер с 2048 импульсами на оборот, будет составлять 100 кГц. В таком случае на выходе длинного кабеля на канале А будет много помех от канала В, и наоборот. Если же используется два противофазных канала А и А' (дифференциальных) и они идут по витой паре проводов, то их суммарное влияние на соседнюю витую пару В и В' очень мало (подавление 45–50 дБ). В итоге даже на 150-метровом кабеле снимается относительно чистый сигнал.

На рис. 6 приведены осциллограммы с марками времени, где канал С (график 4) – изменение шума на оплетке кабеля на чувствительности 500 мВ/дел. Оплетка отключена от земли, установлен резистор 1 кОм на землю, чтобы на приборе контролировать показания тока помех и наводок на оплетке кабеля энкодера. Во время переключения ключей энкодера зафиксированы помехи амплитудой 500 мВ, таким образом ток равен 0,5 мА.

На графиках, изображенных на рис. 5, можно заметить небольшую асимметрию: канал А (график 1) и канал А' (график 2) имеют разную длительность импульса. При рассмотрении сигнала 1 заметно, что длительность импульса больше длительности паузы, а они должны быть равны друг другу.

При рассмотрении осциллограмм на рис. 6 видно, что сначала идет фронт сигнала 1, затем следует фронт сигнала 3.

Между ними 2,4 масштабных единицы (или  $2,4 \times 4 = 9,6$  мкс), что составляет  $9,6 \text{ мкс} \times 4096 = 39,3$  мс на один оборот (или 1526 оборотов в минуту). Но после фронта сигнала 3 идет уже фронт сигнала 2 и между ними всего 1,8 масштабных единицы (или 7,2 мкс), что составляет  $7,2 \times 4096 = 29,5$  мс на оборот (или 2033 оборотов в минуту). Из-за такой разницы контроллер частотного преобразователя «не знает», какое значение ему необходимо использовать для управления. Когда у энкодера такой несимметричный сигнал, нужно включать функцию расчета скорости по периоду импульсов одного канала.

В магнитном энкодере сигнал на выходе симметричный, а в оптическом – всегда есть небольшая асимметрия. Если эта асимметрия достигает 10 электрических градусов, то работа частотного преобразователя Siemens S120 не гарантируется, могут быть спорадические трипы, или скачки частоты.

Если все-таки используется оптический энкодер с несимметричным выходом, то нужно поменять метод расчета скорости частотным преобразователем, чтобы он использовал не фронт или спад импульсов, а весь период. То есть необходимо отключить эвальвацию по четырем фронтам и использовать один канал А. Это делает процесс управления в 4 раза медленнее, но при этом можно использовать несимметричный энкодер.



Рис. 6. Осциллограммы при измерении шума энкодера

Замена в параметре настройки р 437.4 частотного преобразователя ноля на единицу дала возможность работы пятому электромотору на полной скорости, но спустя полчаса теста выбило другой мотор. После этого была произведена замена на всех 6 частотных преобразователях в параметрах настройки р 437.4 нолей на единицы. Испытания лебедки главного гака крана в течение 10 часов на полной скорости не выявили больше никаких всплесков тока и отключений. Необходимо отметить, что вычисление скорости по четырем каналам актуально для работы в режимах позиционирования со скоростями менее 6 об/мин, но лебедка главного гака крана в таких режимах не выполняет никакие технологические операции. Коррекция по статизму для обеспечения быстродействия производится без фильтра, т. е. на каждом импульсе энкодера.

**Выводы.** Проведенные исследования позволили выявить и устранить чрезвычайно сложную причину неисправности в работе группового кранового электропривода на суперсовременном судне-трубоукладчике Seven Vega. Полученные результаты позволяют обеспечить качественную работу группового кранового электрического привода с частотным управлением во всех режимах эксплуатации. Опыт проведенных исследований и ремонтно-наладочных работ может быть использован в различных электротехнических комплексах, в которых используются групповые электрические приводы с частотными преобразователями Siemens. При возникновении подобных ситуаций можно рекомендовать начинать поиск неисправностей и проведение тестирования с получения осциллограмм управляющих сигналов частотных преобразователей и их анализа. При выявлении несимметрии длительности импульсов в работе оптических энкодеров необходимо поменять метод расчета скорости частотным преобразователем, где используется полная длительность периода импульса одного канала, а не разница между фронтами или спадами импульсов четырех каналов.

#### Список литературы

1. **Ship** unified electric-power systems / A.P. Sen'kov, B.F. Dmitriev, A.N. Kalmykov,

L.N. Tokarev // *Russian Electrical Engineering*. – 2017. – No. 88(5). – P. 253–258.

2. **Савенко А.Е., Савенко П.С.** Исследование работы мощного электропривода в автономном электротехническом комплексе // *Вестник ИГЭУ*. – 2017. – Вып. 4. – С. 44–49.

3. **Авербух М.А., Кузнецова А.Д.** Имитационное моделирование динамических процессов в крановом электроприводе с активным выпрямителем // *Интеллектуальная электротехника*. – 2021. – № 1(13). – С. 7–18.

4. **Пачина О.В., Федулеева В.А.** Компьютерная программа для расчета механизма подъема груза // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. – 2023. – № 2(56). – С. 58–62.

5. **Савельев С.В., Фисюренко Д.В.** Определение рациональных параметров грузоподъемных машин // *Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова*. – 2017. – № 3(20). – С. 41–44.

6. **Направления** совершенствования судовых единых электроэнергетических систем / Ю.А. Губанов, И.М. Калинин, А.С. Корнев и др. // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – № 1–1(43). – С. 103–109.

7. **Geertsma R.D., Visser K., Negenborn R.R.** Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion // *Applied energy*. – 2018. – Vol. 228. – P. 2490–2509. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080

8. **Авдеев Б.А.** Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов // *Вестник Керченского государственного морского технологического университета*. – 2021. – № 4. – С. 99–113.

9. **Савенко А.Е., Савенко П.С.** Обеспечение работы электротехнического комплекса современных судов специального назначения с динамическим позиционированием // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 99–108.

10. **Савенко А.Е., Голубев А.Н.** Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах / *Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина*. – Иваново, 2016. – 172 с.

11. **A review** of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications / M.E. Mondejar, J.G. Andreasen, L. Pierobon, et al. // *Renewable & sustainable energy reviews*. – 2018. – Vol. 91. – P. 126–151.

#### References

1. Sen'kov, A.P., Dmitriev, B.F., Kalmykov, A.N., Tokarev, L.N. Ship unified electric-power systems. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 88(5), pp. 253–258.

2. Savenko, A.E., Savenko, P.S. Issledovanie raboty moshchnogo elektroprivoda v

avtonomnom elektrotekhnicheskome komplekse [Research into powerful electric drives in the autonomous electrical power complex]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 4, pp. 44–49.

3. Averbukh, M.A., Kuznetsova, A.D. Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v kranovom elektroprivode s aktivnym vypryamitelem [Simulation of dynamic processes in crane electric drive with active rectifier]. *Intellektual'naya elektrotehnika*, 2021, no. 1(13), pp. 7–18.

4. Pachina, O.V., Feduleeva, V.A. Komp'yuternaya programma dlya rascheta mekhanizma pod"ema gruzha [Computer program for calculating the lifting mechanism]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*, 2023, no. 2(56), pp. 58–62.

5. Savel'ev, S.V., Fisyurenko, D.V. Opredelenie ratsional'nykh parametrov gruzopod'emnykh mashin [Determination of rational parameters of loading machines]. *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova*, 2017, no. 3(20), pp. 41–44.

6. Gubanov, Yu.A., Kalinin, I.M., Kornev, A.S., Kuznetsov, V.I., Sen'kov, A.P. Napravleniya sovershenstvovaniya sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh sistem [Directions of improvement for ship unified power systems]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2019, no. 1–1(43), pp. 103–109.

7. Geertsma, R.D., Visser, K., Negenborn, R.R. Adaptive pitch control for ships with

diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied energy*, 2018, book 228, pp. 2490–2509. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.

8. Avdeev, B.A. Intellektual'nye energoeffektivnye sistemy morskikh sudov [Intelligent energy-efficient systems of marine vessels]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2021, no. 4, pp. 99–113.

9. Savenko, A.E., Savenko, P.S. Obespechenie raboty elektrotekhnicheskogo kompleksa sovremennykh sudov spetsial'nogo naznacheniya s dinamicheskimi pozitsionirovaniem [Supporting the operation of the electrical power system of modern special purpose vessels with dynamic positioning]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2021, book 23, issue 6, pp. 99–108.

10. Savenko, A.E., Golubev, A.N. Obmenyye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh [Power exchange oscillations in ship electrotechnical complexes]. Ivanovo, 2016. 172 p.

11. Mondejar, M.E., Andreasen, J.G., Pierobon, L., Larsen, U., Thern, M., Haglind, F. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2018, book 91, pp. 126–151.