

УДК 681.2.8

Система on-line мониторинга эффективности использования мощности гребного электродвигателя при эксплуатации судов в ледовых условиях

Куркова О. П., Ефимов В. В.

Постановка проблемы и частной задачи: Проблема повышения эффективности использования мощности гребного электродвигателя (ГЭД) при эксплуатации судов в ледовых условиях является одним из аспектов решения комплексной проблемы обеспечения требований безопасности и ресурсосбережения при эксплуатации морского транспорта в Арктике. Учитывая, что ледовое воздействие на судно имеет стохастический и трудно прогнозируемый характер, проблема повышения эффективности использования мощности ГЭД может быть решена путем обеспечения судоводителя оперативными данными о фактических значениях потери полезной мощности ГЭД при тех или иных выбираемых им режимах движения судна в реальных ледовых условиях. Данная информация может быть получена судоводителем при условии оборудования движительно-рулевого комплекса (ДРК) судна системой on-line мониторинга, исходно измеряемыми физическими величинами которой, являются крутящий момент, осевое усилие на гребном валу и скорость его вращения. Система on-line мониторинга при этом должна одновременно обеспечивать процессы синхронных высокоточных измерений параметров динамики стохастически изменяющихся величин, высокоскоростную обработку данных измерений, сохранение и передачу большого объема информации, функционировать в непрерывном режиме в течение длительного промежутка времени в период всего рейса судна. Аппаратура системы должна обладать минимально возможными массогабаритными характеристиками, не создавать дополнительных нагрузок на конструктивные элементы ДРК и бортовую систему энергоснабжения. Создание такой системы стало возможным благодаря появлению в последнее десятилетие радиоэлектронных чип-компонентов на базе интегральных микросхем на кристаллах, а также новых результатов исследований в области магнитоэлектродинамики. **Целью работы** является разработка комплекса новых технических решений и создание на их основе опытной системы on-line мониторинга эффективности использования мощности ГЭД при эксплуатации судов в ледовых условиях, натурная апробация опытного образца системы и выработка рекомендаций по ее применению. **Используемые методы и технологии:** Решение задачи создания комплекса системы on-line мониторинга основано на комплексном использовании: методов тензометрических измерений поверхностных микродеформаций и измерений параметров перемещений на основе эффекта Холла с последующим вычислением значений крутящего момента, осевого усилия, мощности на вращающемся гребном валу; технологий беспроводной передачи электроэнергии по принципу магнитно-резонансной индукции и высокоскоростной беспроводной передачи данных по цифровому радиоканалу двустороннего обмена. **Новизна:** Элементами новизны являются результаты расчетов параметров и конфигурации взаимосвязанных контуров магнитной индукции и резонанса; конструктивно-технологические решения магнитно прозрачных и непрозрачных «экранов»; схемотехнические решения, основанные на модульном принципе с использованием интегральных чип-компонентов; комплекс алгоритмов интерфейсов управления и обработки данных измерений. **Результат:** Опытный образец системы on-line мониторинга успешно прошел натурную апробацию на научно-экспедиционном судне «Академик Трешников» в процессе рейса в ледовых условиях, подтвердив свою работоспособность. Технорабочий проект системы прошел экспертизу и получил одобрение РМРС в части выполнения требований установки и применения на судне. **Практическая значимость:** Дан-

Библиографическая ссылка на статью:

Куркова О. П., Ефимов В. В. Система on-line мониторинга эффективности использования мощности гребного электродвигателя при эксплуатации судов в ледовых условиях // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 31-53. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/03-Kurkova.pdf>

Reference for citation:

Kurkova O. P., Efimov V. V. On-line Monitoring System Power Efficiency of a Propulsion Motor when Operating Ships in Ice Conditions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 31-53. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/03-Kurkova.pdf> (in Russian).

ные мониторинга, получаемые в процессе натурной апробации опытного образца, позволили судоводителю оперативно оптимизировать уровень использования мощности ГЭД при прохождении судном ледовых полей путем выбора соответствующих режимов движения, что подтвердило целесообразность применения подобных систем на судах ледовых классов. Разработанные технические решения для системы мониторинга судов, могут быть использованы в проектах аналогичных систем для других видов техники, включающих вращающиеся элементы, приводимые в действие высокомоментными электродвигателями.

Ключевые слова: электродвижение судов, гребной электродвигатель, эффективная мощность, валопровод, крутящий момент, упор, осевое усилие, ледовое сопротивление, крутильные колебания, частота вращения, on-line мониторинг, тензометрия, технология беспроводной передачи электроэнергии, магнитно-резонансная индукция, контур индуктивности, эффект Холла, ротор, статор, радиоканал, приемопередатчик, микроконтроллер, микросхема на кристалле, резонатор, интерфейс.

Введение

Одним из аспектов комплексной проблемы повышения эксплуатационной эффективности судовых энергетических установок электродвижения является повышение эффективности использования мощности гребного электродвигателя (ГЭД) при установленных требуемых режимах движения судна. Для судов, эксплуатируемых в ледовых условиях, задача повышения эффективности использования мощности ГЭД (как составляющей суммарного показателя эффективности) является одной из приоритетных. Ее приоритетность обусловлено не только необходимостью обеспечения безопасности эксплуатации судна и судового оборудования, но и необходимостью обеспечения снижения расхода топлива, сокращения ходового времени и т.д., т.е. взаимосвязью с задачами ресурсосбережения.

Крутящий момент и упор гребного винта являются основными параметрическими характеристиками судового движителя. Скорость судна (V) прямо пропорциональна мощности, подводимой к гребному винту ($N_{\text{в}}$) гребным валом с учетом коэффициента полезного действия гребного винта ($\eta_{\text{в}}$), и обратно пропорциональна упору (P):

$$V = \frac{N_{\text{в}} \eta_{\text{в}}}{P}. \quad (1)$$

Валопровод представляет собой конструктивный комплекс, кинематически связывающий ГЭД с гребным винтом и предназначенный для передачи крутящих моментов и осевых нагрузок, возникающих при работе судовой двигательной системы, составной частью которой он является.

Мощность ($N_{\text{в}}$), подводимая к гребному винту, прямо пропорциональна мощности ГЭД ($N_{\text{д}}$) с учетом коэффициентов полезного действия валапровода ($\eta_{\text{вл}}$) и редукторной передачи ($\eta_{\text{р}}$) при ее наличии:

$$N_{\text{в}} = N_{\text{д}} \eta_{\text{вл}} \eta_{\text{р}}. \quad (2)$$

Учитывая, что мощность равна произведению крутящего момента ($M_{\text{кр}}$) на угловую скорость вращения (ω):

$$N = M_{\text{кр}} \omega. \quad (3)$$

о степени использования мощности ГЭД при обеспечении требуемой скорости движения судна можно судить по соотношению фактического крутящего момента на гребном валу и крутящего момента на валу отбора мощности ГЭД.

При этом, с точки зрения оценки эффективности, гребной винт, валопровод и ГЭД необходимо рассматривать как единую динамическую силовую систему (рис. 1).

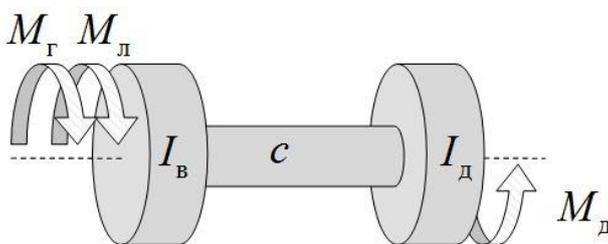


Рис. 1. Силовая схема валопровода:

M_{Γ} – крутящий момент, вызываемый гидравлическим сопротивлением;

$M_{\text{л}}$ – крутящий момент, вызываемый ледовым сопротивлением;

$M_{\text{д}}$ – крутящий момент гребного ГЭД

В процессе эксплуатации судна во льдах гребной винт напрямую взаимодействует со льдом и испытывает не только гидравлическое, но и ледовое сопротивление. Ледовые нагрузки от гребного винта передаются на элементы валопровода, включая все конструктивные составляющие валолинии (гребной и промежуточные валы, вал отбора мощности ГЭД), что обуславливает появление дополнительных скручивающих моментов, а также вынужденных крутильных и продольных колебаний на валах валолинии. В процессе работы различные участки линии валопровода, имеющего большую длину и переменный диаметр, нагружаются силами и моментами неодинаково. Значительные моменты инерции сосредоточенных масс на различных участках валолинии, соединенных между собой протяженными участками валопровода с малой податливостью, выводят валолинию из состояния равновесия и приводят к возникновению собственных колебаний. Внешние воздействия на гребной винт (в том числе ледовое воздействие), передаваемое валопроводу, является источником вынужденных колебаний. В случае возникновения резонанса собственных и вынужденных колебаний, амплитуда собственных колебаний неограниченно возрастает, что не только может привести к увеличению напряженно-деформируемого состояния вала до значений, превосходящих расчетные пределы, но и к усилению радиального износа подшипников, задействованных в системе валопровода, в том числе подшипников ГЭД. При этом ледовые нагрузки, как правило, в несколько раз превышают соответствующие гидродинамические нагрузки при эксплуатации судна на чистой воде и могут быть определяющими как для прочных характеристик гребного винта, валопровода и других конструктивных элементов комплекса, лежащих в системе единой силовой линии валопровода, так и для стабильности динамики функционирования ГЭД. Недостаток крутящего момента ГЭД при преодолении ледового сопротивления резко сказывается на частоте вращения гребного винта, приводя к дестабилизации и снижению упора гребного винта и, в конечном счете, к потере полезной

тяги. Известно, что на практике неоднократно возникали ситуации, когда частота вращения снижалась практически до нуля, а ледовый момент на валу резко возрастал, что становилось причиной возникновения опасных ситуаций. Учитывая, что для судов ледового плавания требуется ГЭД высокой мощности, наиболее частое применение находят синхронные ГЭД, при мощностях более 1 МВт обладающие целым рядом преимуществ по отношению к асинхронным ГЭД. Синхронные двигатели, прежде всего, обладают высокими коэффициентами мощности и крутящим моментом при более высоком КПД, высокой перегрузочной способностью и меньшей чувствительностью к колебаниям питающего напряжения, высокой эффективностью на долевых нагрузках, значительно меньшими массогабаритными характеристиками. Однако особенностью синхронных электродвигателей является то, что они обладают абсолютно жесткими механическими характеристиками. При некотором предельном или максимальном значении нагрузочного момента синхронный двигатель выходит из устойчивой синхронной работы, что может привести к его остановке. Увеличение обратного осевого усилия на элементы валолинии, в том числе на вал отбора мощности ГЭД, вызываемое повышенным ледовым сопротивлением, может привести к рассинхронизации ГЭД. Аналогично к дестабилизации работы ГЭД приводят повышенные и неравномерные радиальные зазоры в подшипниках ГЭД. При этом необходимо учитывать, что ледовое воздействие на судно имеет стохастический и трудно предсказуемый характер. К сожалению, до настоящего времени нет адекватного теоретического описания связи между ледовой нагрузкой и параметрами состояния и функционирования валосистемы в целом. Существующие и используемые расчетные схемы, а также действующие требования Классификационных Обществ, в том числе Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС), в большинстве случаев основаны на опыте эксплуатации судов в ледовых условиях и носят эмпирический характер (в виде использования при расчетах соответствующих эмпирических коэффициентов), не отражая фактических физических процессов. При этом следует признать и отсутствие технических средств, реализующих прямое раздельное измерение гидродинамического и ледового сопротивления и упора гребного винта. Одновременно разработанные рядом авторов методики имитационного моделирования синхронного ГЭД позволяют довольно-таки достоверно представить процесс его функционирования на стабильных режимах. Точное моделирование параметров функционирования ГЭД при переходных процессах, обусловленных динамическими изменениями моментов и упора, являющихся следствием воздействия льда (в том числе импульсного ударного воздействия), без дополнительных точных данных о фактических значениях и характере изменений крутящих моментов и осевого усилия, а также параметров радиальных крутильных колебаний на валопроводе не представляется возможным. Отсутствие возможности спрогнозировать оптимальные режимы эксплуатации ГЭД в условиях ледового плавания судна затрудняет и решение задач компенсации внешних ледовых воздействий при создании систем управления ГЭД и главной энергетической установкой (ГЭУ) в целом, а также усложняет задачи создания и настройки системы защиты ГЭД от перегрузок. Все выше сказанное не может в полной

мере соответствовать современным требованиям по обеспечению безопасности и ресурсосбережения при эксплуатации судов ледового плавания.

Данная проблема может быть решена путем создания и применения системы on-line мониторинга эффективности использования мощности ГЭД и безопасности при эксплуатации судов в ледовых условиях, основанной на on-line измерениях фактических значений крутящих моментов, осевых усилий, частоты вращения непосредственно на валах валолинии. Применение системы мониторинга позволит не только получать необходимые оперативные исходные данные для управления эффективностью использования мощности ГЭД и оптимизации режимов его функционирования, своевременно фиксировать и оповещать экипаж судна о приближении к «нерасчетному режиму эксплуатации», но также формировать и сохранять базы данных для дальнейшего использования. Например, при диагностике технического состояния, планировании технического обслуживания и ремонтов двигательного-двигательного комплекса; при создании новых систем управления двигательными-двигательными системами для судов ледового плавания. До недавнего времени создание и внедрение стационарной информационно-измерительной системы on-line измерений крутящих моментов и осевых усилий на вращающихся судовых валах и обработки данных измерений в масштабе реального времени (прежде всего, пересчета фактических мощностей) было связано с наличием ряда проблемных технических аспектов таких, как необходимость создания устройств для обеспечения:

- стабильного беспроводного электропитания средств измерений, устанавливаемых на вращающемся вале, обеспечивающего возможность выполнения высокоточных высокочастотных измерений (с частотой измерений, соответствующей параметрическим характеристикам динамических процессов воздействия льда – процессов воздействия циклических и импульсных ударных нагрузок) на протяжении длительного временного периода;
- беспроводной в масштабе реального времени первичной обработки и передачи данных от средств измерений, устанавливаемых на вращающихся валах, к модулю сбора и обработки информации, с минимальными потерями в части их метрологических показателей (в соответствии с требованиями нормативной документации Системы единства измерений);
- высокоскоростной математической обработки данных измерений;
- сохранения большого объема получаемых информационных данных с одновременной минимизацией массогабаритных характеристик всех конструктивных компонентов, входящих в состав системы мониторинга, исключая возможность создания дополнительных нагрузок на элементы силовой валолинии, а также обеспечивая возможность их монтажа в рамках ограниченного рабочего пространства судовых помещений валопровода и ГЭД.

Как известно, наибольшую точность измерений крутящих моментов и осевых усилий обеспечивает хорошо известный метод тензометрии. Однако, созданные ранее аппаратные средства тензометрических измерений крутящих

моментов на вращающихся судовых валах, в которых в качестве источников питания предусматривается использование аккумуляторных батарей (ресурса которых без подзарядки хватает лишь от нескольких часов до несколько дней работы), нашли свое использование только в качестве средств измерений в лабораторных условиях и для проведения эпизодических измерений в процессе ходовых испытаний судна. Эти средства измерений не могут быть использованы в качестве стационарных штатных судовых систем мониторинга, непрерывно функционирующих на протяжении всего длительного периода рейса судна, так как не удовлетворяют функциональным требованиям, предъявляемым к системам on-line мониторинга. Только современный уровень развития компонентной радиоэлектронной базы позволил решить все перечисленные выше проблемные задачи.

Устройство и принцип функционирования системы

Специалистами ОАО «Авангард» (г. Санкт-Петербург) разработан информационно-измерительный аппаратно-программный комплекс (АПК) системы on-line мониторинга крутящего момента, осевого усилия на валах валопровода, частоты вращения и эффективности использования мощности ГЭД специально для судов, эксплуатируемых в ледовых условиях. В основе комплекса одновременно использованы:

- технология измерений крутящего момента и осевых усилий посредством тензометрических измерений поверхностных деформаций;
- технология измерения частоты вращения вала на основе эффекта Холла;
- технология беспроводной передачи электроэнергии по принципу магнитно-резонансной индукции;
- технология высокоскоростной беспроводной передачи данных по цифровому радиоканалу двухстороннего обмена.

Аппаратно-программный комплекс (рис. 2) состоит из двух тензометрических сенсоров, закрываемых защищенным кожухом, (поз. 1) и ротора (поз. 2), устанавливаемых непосредственно на вращающемся валу и взаимосвязанных между собой по средствам проводной связи; неподвижных статора (поз. 3) и электронного блока интерфейса /сбора и обработки данных измерений/ (поз. 4), устанавливаемых на конструктивных элементах корпуса судна и также взаимосвязанных между собой по средствам проводной связи, а также комплекса программного обеспечения. Комплекс создан по модульному принципу. Укрупненная блок-схема аппаратного комплекса представлена на рис. 3.

В качестве сенсоров использовались фольговые тензорезисторы типа N2A-06-S120P-10C производства компании «Vishay M-M» (США) – полный мост, представляющие собой унифицированные шаблоны, позволяющие на их основе формировать различные конфигурации мостовых схем. Габаритные размеры тензосетки – 2,54 мм × 3,05 мм, суммарные габаритные размеры сенсора – 8,76 мм × 7,49 мм. Материал чувствительных элементов – константан (45% Ni; 55% Cu), характеризующийся температурной стабильностью, высоким удельным сопротивлением и отсутствием существенных изменений при пере-

ходе от упругих к пластическим деформациям, а также обладающий высокими усталостными характеристиками и высокой временной стабильностью. Материал подложки – полиимид толщиной 0,02 мм. Коэффициент тензочувствительности тензорезистора – $GF=2,1$. Суммарное сопротивление – 1000 Ом $\pm 0,2\%$ (4×250 Ом). Напряжение возбуждения от 2,5 В до 10 В. Рабочий диапазон измеряемых деформаций – $\pm 3000 \mu\varepsilon \pm 3\%$, что соответствует требуемому диапазону возможных поверхностных деформаций даже в зоне критических сечений валопровода. В соответствии с общепринятой методикой тензометрических измерений тензорезистор для измерения крутящего момента устанавливается на вращающийся вал под углом 45° к оси вращения вала, тензорезистор для измерения осевого усилия – под углом 90° к оси вращения.

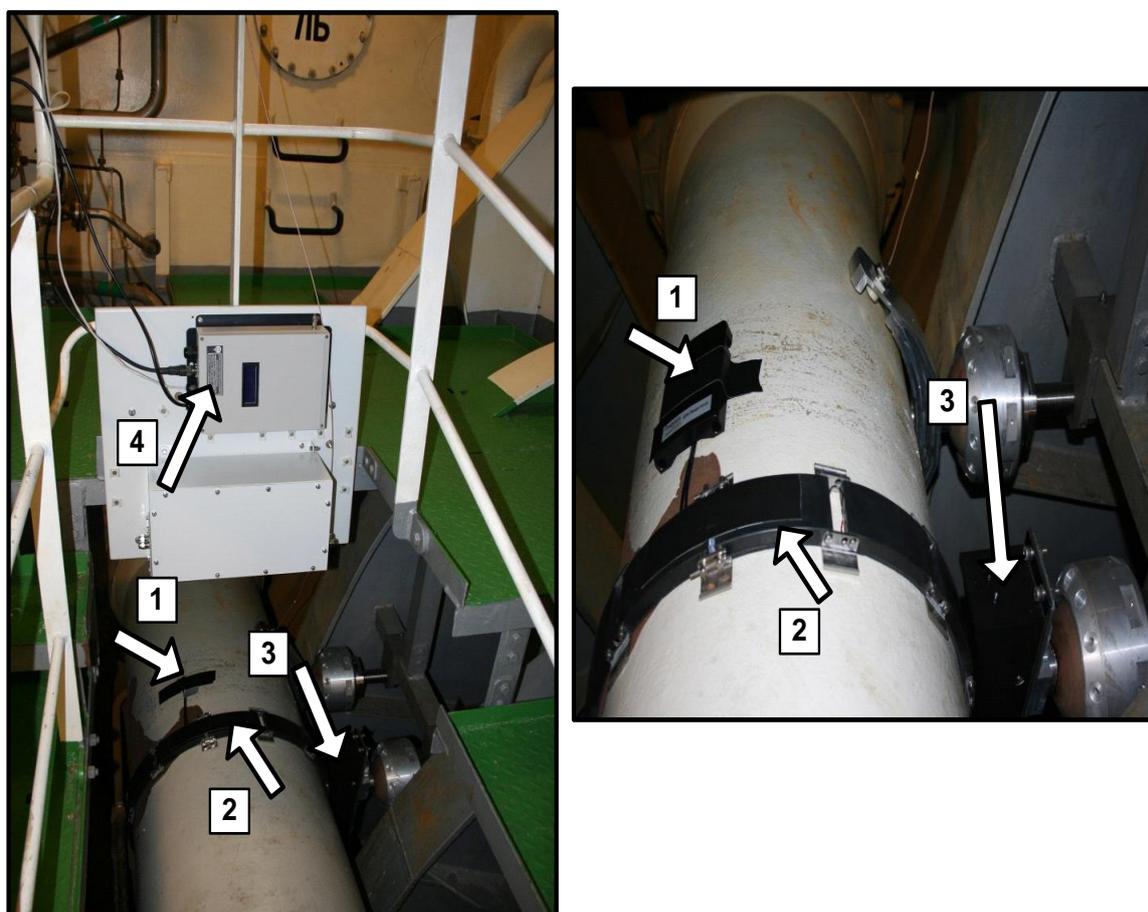


Рис. 2. Общий вид аппаратно-программного комплекса системы мониторинга, установленного на валопроводе НЭС «Академик Трешников»: 1 – блок тензосенсоров; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – модуль интерфейса

Ротор представляет собой набор механически и электрически соединенных между собой секций (количество которых зависит от диаметра вала), образующих замкнутый пояс обхватывающий вал. Каждая секция, содержит однообмоточную без сердечника катушку индуктивности. Обмотка катушки имеет форму прямоугольника ($40 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$), состоит из 280 витков и выполнена из медной изолированной проволоки диаметром 0,25 мм общей протяженностью 78,4 м. Обмотки всех секций соединены между собой через платы выпрямителей (AC IN).

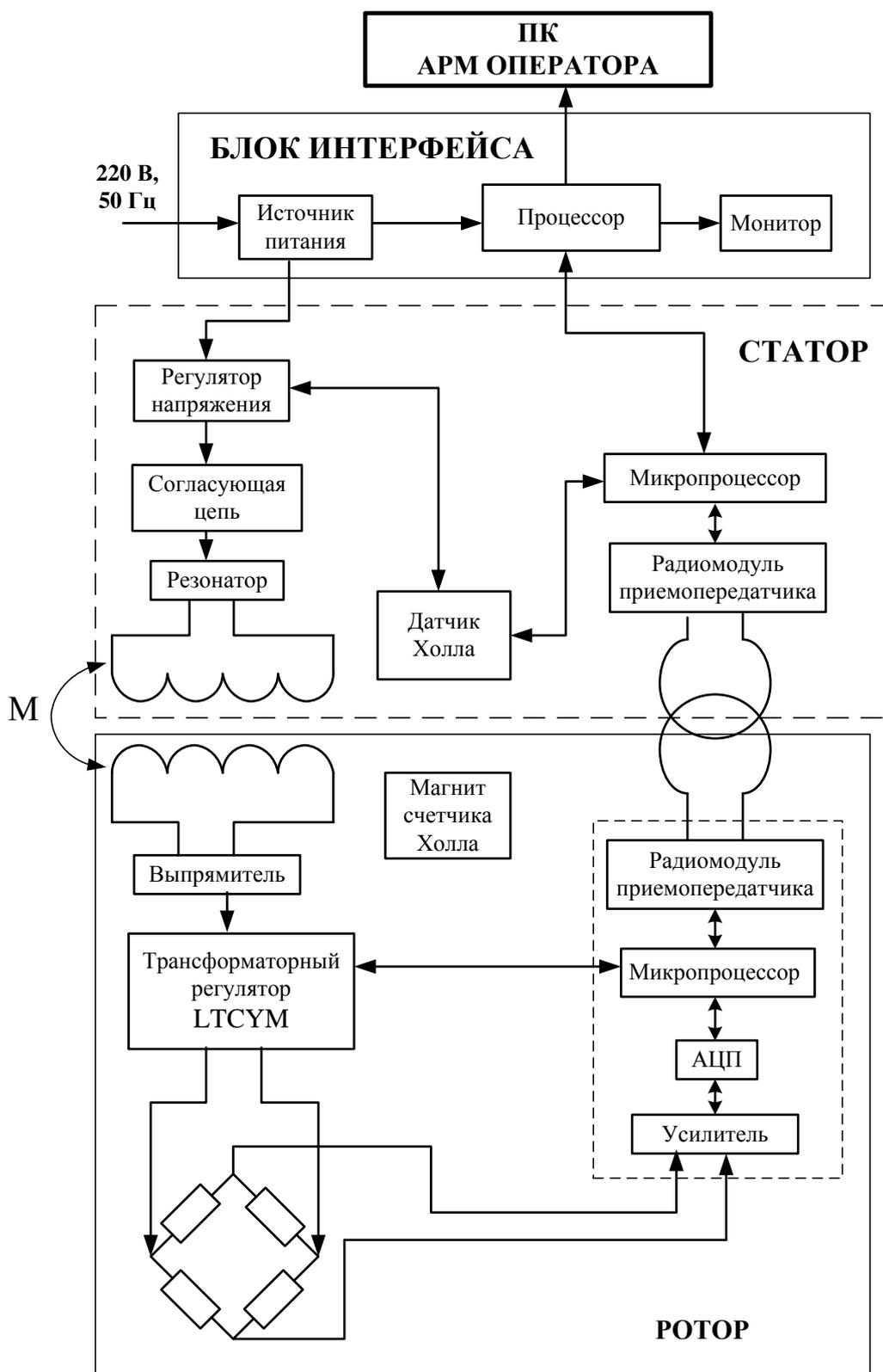


Рис. 3. Блок-схема аппаратного комплекса системы мониторинга

Первая секция пояса ротора (рис. 4) кроме обмотки индуктивности (поз. 1) и платы выпрямителя (поз. 2) включает электронный блок управления процессом формирования сигнала возбуждения и фиксации выходного напряжения тензорезисторов, процессом первичной обработки аналоговых выходных сигналов и передачи данных измерений от ротора к статору.

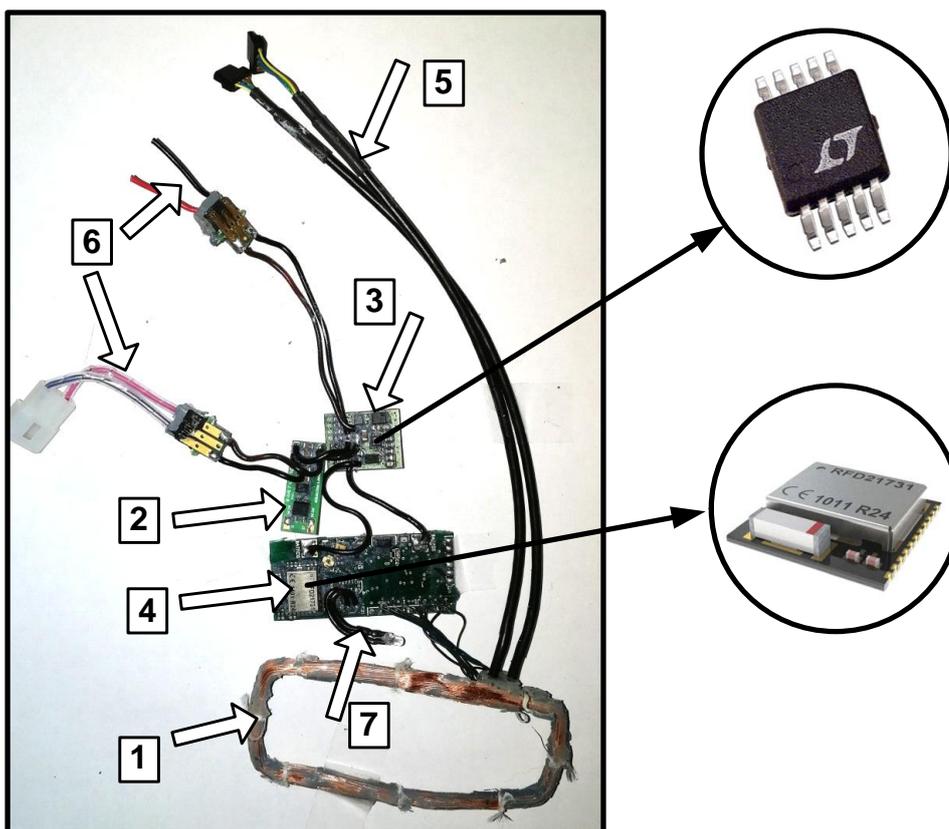


Рис. 4. Электронные компоненты ротора: 1 – обмотка индуктивности; 2 – плата выпрямителя; 3 – плата LTC3588; 4 – плата приемопередатчика RFD21731; 5 – разъемы подключения тензорезистивных сенсоров; 6 – разъемы-соединители контуров индуктивности секций ротора между собой

Электронный блок ротора включает плату (поз. 3) понижающего высокоскоростного трансформаторного регулятора-переключателя (LTC3588) со встроенным полупроводниковым импульсным диодом типа диода Шоттки производства компании «Linear Technology» (США) и плату (поз. 4) радиочастотного приемопередатчика на базе модуля RFD21731 производства компании «RF Digital Wireless» (США). Модуль RFD21731 (габаритные размеры – 15 мм × 15 мм × 3,5 мм) представляет собой однокристальное решение интегрированного модуля, объединяющего однокиповый программируемый 8-битный микроконтроллер и 2,4 ГГц беспроводной приемопередатчик nRF24LE1-F16Q24, флеш-память, счетчик в реальном времени и три 16-битных таймера, AES ускоритель шифрования и генератор случайных чисел. Модуль RFD21731 использует синхронный интерфейс SPI, имеет малые характеристики энергопотребления, что позволяет устанавливать его непосредственно на вращающемся валу в составе ротора. Трансформаторная плата (поз. 3) через платы выпрямителей (поз. 2) соединена с катушками индуктивности всех секций (поз. 6), питает модуль приемопередатчика (поз. 4) и обеспечивает подачу напряжения возбуждения к подключенным по 4-х проводной схеме тензорезисторам (поз. 5). Использование 4-х проводной схемы подключения тензорезистора значительно уменьшает температурное влияние на величину выходного

сигнала. В замыкающую секцию пояса ротора кроме обмотки и платы выпрямителя установлен постоянный магнит. Конструктивно все электронные компоненты секций располагаются во внутреннем пространстве обмотки, установленной внутри корпуса, изготовленного из пластичного магнитопрозрачного каучука. Обмотка вместе с электронными компонентами полностью изолированы между собой по средствам силиконовой заливки внутреннего объема корпуса секции.

Статор состоит из корпуса, изготовленного из диэлектрического материала, одна из сторон которого выполнена в виде сектора концентрической окружности по отношению к оси вращения судового вала; четырех обмоток катушки индуктивности и электронного блока. Каждая обмотка имеет форму прямоугольника (55 мм × 120 мм), состоит из 70 витков и выполнена из медной изолированной проволоки диаметром 0,55 мм общей протяженностью 24,5 м. Обмотки установлены внутрь корпуса статора вдоль радиусной стороны попарно симметрично относительно центральной оси сектора на $2/3$ длины перекрывая друг друга.

Электронный блок статора включает модуль приемопередатчика и управления (рис. 5) и модуль электропитания (рис. 6). Модуль приемопередатчика и управления (рис. 5) выполнен на базе беспроводного радиомодуля RFD21712 (поз. 1), производства компании «RF Digital Wireless» (США), программируемого микроконтроллера ADUC842 (поз. 2) производства компании «Analog Device» (США) и полупроводниковых транзисторов – регуляторов напряжения (поз. 3). Используемый интерфейс – интерфейс SPI.

Радиомодуль RFD21712, работающий на частоте 2,4 ГГц и сопрягаемый с приемопередатчиком ротора RFD21731, включает непосредственно программируемую микросхему на кристалле NRF24L01⁺ 0807AF (поз. 4) производства компании «Nordic Semiconductor» (Норвегия), и кварцевый резонатор на кристалле RFD58002 (HC49 SMT) (поз. 5) производства компании «Transko Electronics» (США), предназначенный для стабилизации и выделения электрических колебаний определенной частоты (полосы частот) в аналогово-цифровых цепях. Используемый кварцевый резонатор HC49 SMT (габаритные размеры – 10,5 мм × 3,8 мм × 4,75 мм) с резонансной частотой 16 МГц, в широкой полосе частот имеет сопротивление ёмкостного характера и только на некоторых (рабочих) частотах имеет широко выраженный резонанс (уменьшение сопротивления), благодаря чему обеспечивает лучшие характеристики в части стабилизации частоты, в том числе при изменении температуры окружающей среды. При этом радиомодуль RFD21712 обеспечивает функции многофункционального трансивера (синтезатора частоты, усилителя мощности, генератора, модулятора и демодулятора и другие).

Устройство ADUC842 (габаритные размеры – 8 мм × 8 мм) включает в себя, выполненные на одном кристалле: многоканальный АЦП с самокалибровкой, два 12-ти разрядных ЦАП, два 16-ти разрядных ЦАП, два 16-ти разрядных ШИМ-модулятора, счетчик времени, три таймера, три порта последовательного обмена (SPI 12С и UART) и быстродействующий (16,77 МГц) с одноцикловым выполнением команд 8-ми разрядный программируемый микроконтроллер

8052, являющийся ядром контроллера, способный обеспечить пиковую производительность до 16 MIPS. Кроме этого на кристалле ADUC842 возможно разместить 62 Кбайт неразрушаемой Flash/EEPROM памяти программ, 4 Кбайт Flash/EEPROM памяти данных, 256 байт памяти с произвольным доступом и 2 Кбайт расширенной памяти с произвольным доступом. Благодаря своим уникальным возможностям и характеристикам ADUC842 является прецизионным инструментом для создания интеллектуальных средств измерений.

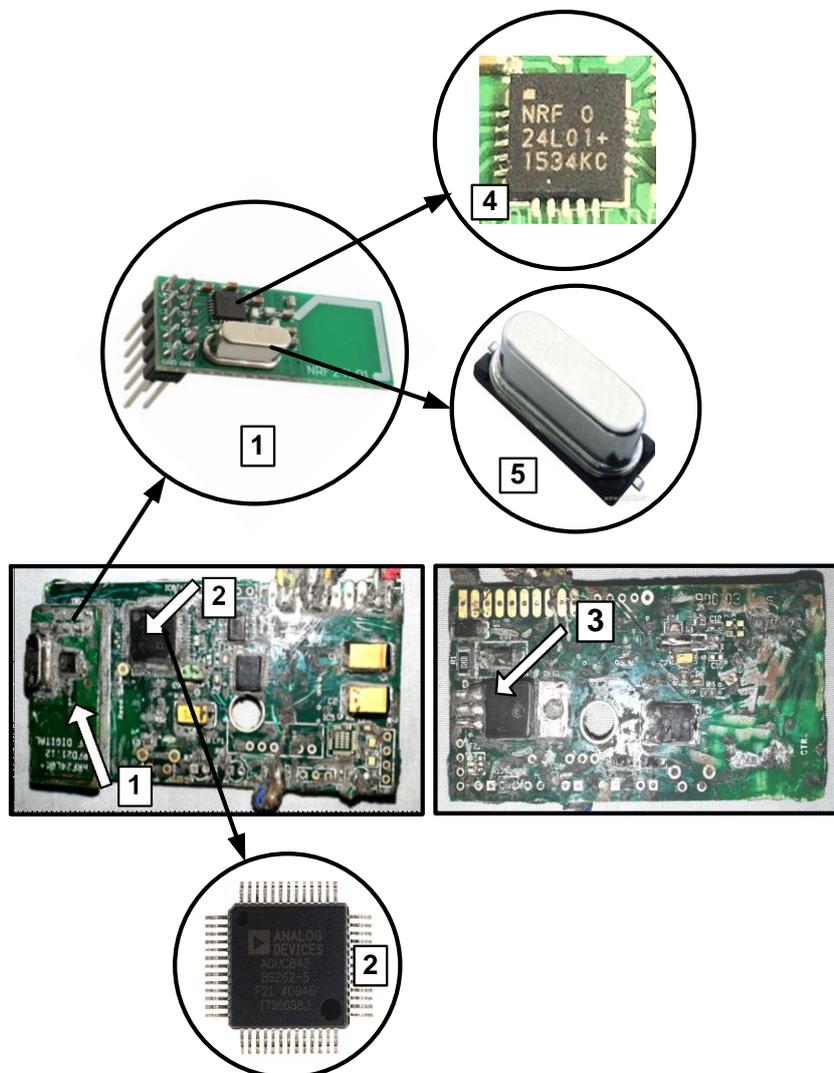


Рис. 5. Электронный блок статора – модуль приемопередатчика и управления: 1 – радиомодуль RFD21712; 2 – микроконтроллер ADUC842; 3 – регулятор напряжения; 4 – микросхема NRF24L01+; 5 – кварцевый резонатор RFD58002

Основными компонентами модуля электропитания (рис. 6) являются контур резонатора (поз. 1), образованный катушками индуктивности и подключенными конденсаторами; электролитический конденсатор-компенсатор (поз. 4); датчик Холла (поз. 2) и полупроводниковые транзисторы, выполняющие роль регуляторов напряжения и переключателей (поз. 3). Статор подключен к сети переменного тока 24 В от источника питания блока интерфейса (поз. 4 на рис. 2). При установке в корпус статора обмотки индуктивности заливаются

магнитнопрозрачным герметиком, а платы электронного блока изолируются посредством сплошной заливки экранирующим вулканизированным каучуком с аморфным наполнителем магнитомягкого материала.

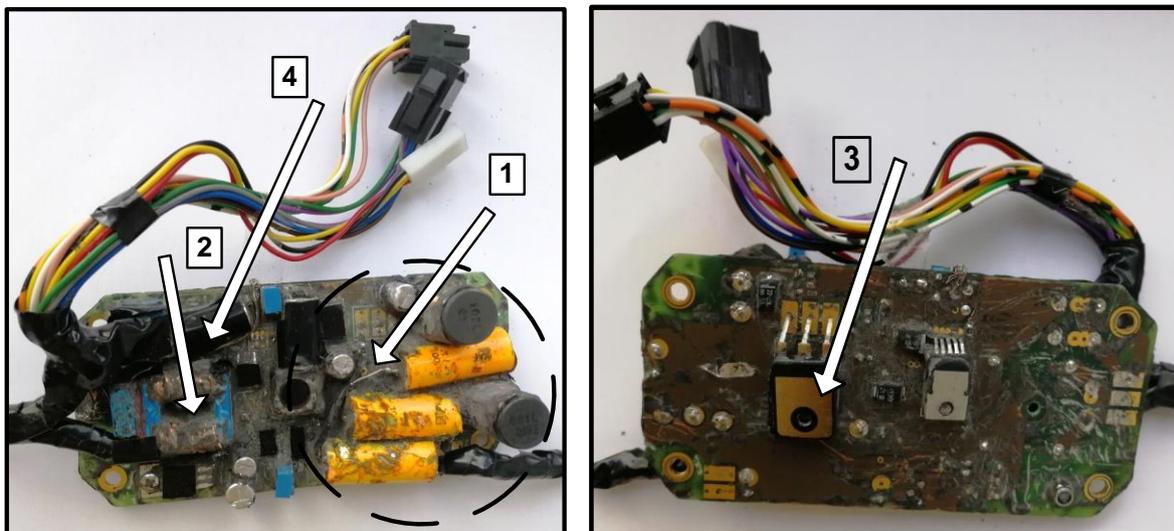


Рис. 6. Электронный блок статора – модуль электропитания:
1 – контур резонатора; 2 – датчик Холла; 3 – регулятор напряжения;
4 – конденсатор-компенсатор

Электронный блок интерфейса (управления, сбора и обработки данных измерений) (рис. 7) включает непосредственно универсальный блок интерфейса (поз. 1) и ультра компактный импульсный блок питания типа TMP30124C (поз. 2) компании «TRACO Power Electronic» (США).

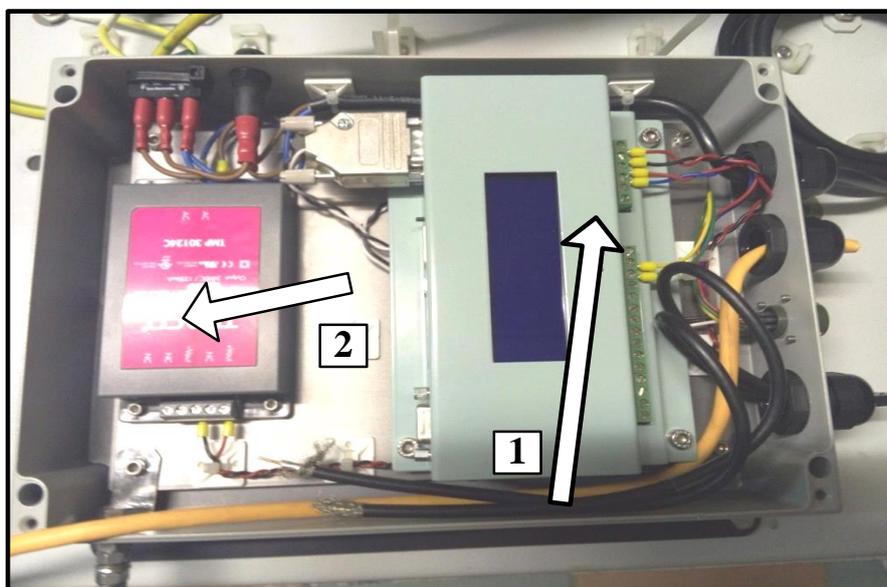


Рис. 7. Электронный блок интерфейса:
1 – универсальный блок интерфейса; 2 – блок питания

Блок питания TMP30124C с диапазоном мощностей от 15 Вт до 30 Вт, подключаемый к общесудовой сети электропитания, обеспечивает выходное напряжение 1:24 В, выходной ток 1:1250 мА с частотой выходного сигнала от 47 Гц до 440 Гц при входном напряжении от 85 В до 264 В переменного тока.

Блок интерфейса, подключаемый к источнику питания от 15 В до 24 В, обеспечивает все универсальные аналоговые интерфейсы, имея 4 аналоговых канала: 4:20 мА; 4:12 мА; ±5 В DC, ±10 В DC, последовательные интерфейсы RS232/485, а также имеет возможность подключения через USB порт к персональному компьютеру АРМ оператора (или ноутбуку) или к сети Ethernet, способен принимать стандартную карту памяти, обеспечивая запись значений параметров измерений в виде простого текстового файла.

Процесс беспроводной передачи электроэнергии от статора к ротору, основанный на технологии магнитного резонанса, осуществляется следующим образом. Обмотки ротора и статора представляют собой взаимосвязанные катушки индуктивности, расположенные в параллельных плоскостях и разделенные воздушным зазором. При подаче напряжения на обмотку статора (первичная обмотка) формируется магнитный поток, направленный по оси перпендикулярной плоскости расположения обмоток ротора и статора, совпадающей с радиальным направлением вращающегося вала. Обмотка статора индуцирует в обмотке ротора (вторичная обмотка) ЭДС, т.е. в обмотке ротора создается наведенный с первичной обмотки ток. Эффективность передачи энергии зависит от степени взаимосвязи взаимосвязанных контуров индуктивности. Степень взаимосвязи определяется добротностью контуров индуктивности (Q), определяемой как:

$$Q_i = \frac{2\pi f_i L_i}{R_i}, \quad (4)$$

где: L_i – собственная индуктивность i -го контура индуктивности;

R_i – активное сопротивление i -го контура индуктивности;

f_i – частота i -го контура индуктивности;

и коэффициентом их взаимосвязи (k), определяемым как:

$$k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (5)$$

где: L_1 – собственная индуктивность первичного контура (в нашем случае – обмотки статора);

L_2 – собственная индуктивность вторичного контура (в нашем случае – обмотки ротора);

M_{12} – взаимная индукция обмоток ротора и статора.

В соответствии с классификацией Ассоциации потребителей электроники СЕА (Consumer Electronics Association) принято считать, что если $kQ < 1$, контура обладают слабой связью; если $kQ > 1$ – сильной связью. Значение $kQ = 1$ принято считать критической величиной.

Отсюда видно, что для увеличения взаимосвязи контуров, следовательно, и эффективности передачи энергии, контура должны обладать как минимум соизмеримыми значениями собственной индуктивности (как показатель пропорциональности между током в витке и магнитным потоком через площадь сечения витка), которые в общем случае, если руководствоваться законом Био-Савара-Лапласа, определяются как:

$$L_1 = \frac{n_1^2 \mu_0}{2} \int_0^{a_1 - \delta_1} \rho d\rho \int_0^{2\pi} \frac{a_1^2 - \rho a_1 \cos \varphi}{(\rho^2 + a_1^2 - 2\rho a_1 \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi, \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{n_2^2 \mu_0}{2} \int_0^{a_2 - \delta_2} \rho d\rho \int_0^{2\pi} \frac{a_2^2 - \rho a_2 \cos \varphi}{(\rho^2 + a_2^2 - 2\rho a_2 \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi, \quad (7)$$

где: n_i – количество витков в i -ом контуре индуктивности;

a_i – радиус i -го контура индуктивности;

δ_i – радиус сечения провода i -го контура индуктивности;

μ_0 – магнитная постоянная;

ρ – расстояние от оси витка до некой точки пространства магнитного поля на удалении от плоскости контура индуктивности;

φ – угол между переменным радиус-вектором из центра витка контура индуктивности (начала полярной системы координат) в произвольную точку витка и осью полярной системы координат в плоскости контура индуктивности.

Тогда взаимную индуктивность двух контуров (M), находящихся на некотором расстоянии друг от друга (d_{12}) можно представить как:

$$M_{12} = \frac{n_1 n_2 \mu_0}{2} \int_0^{a_2 - \delta_2} \rho d\rho \int_0^{2\pi} \frac{a_1^2 - \rho a_1 \cos \varphi}{(\rho^2 + a_1^2 + d_{12}^2 - 2\rho a_1 \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi. \quad (8)$$

Как следует из выражений (8) и (4) при одинаковых значениях индуктивности уровень взаимосвязи контуров индуктивности зависит от расстояния между катушками (чем больше величина воздушного зазора, тем слабее взаимосвязь), точности их взаимной ориентации (соосности) и частоты (чем больше частота, тем сильнее взаимосвязь контуров индуктивности).

В нашем случае обмотка статора обладает индуктивностью $L_1=9,6$ мкГн, а обмотка одной секции ротора составляет $L_2=8,09$ мкГн (практически равнозначны). Чтобы коэффициент взаимосвязи контуров находился в интервале от 50 % до 100 %, расстояние между катушками индуктивности (зазор между ротором и статором) должен составлять от 1 мм до 3 мм. Однако учитывая, что вследствие возможных крутильных колебаний валопровода, радиальные отклонения вала могут достигать до 2,5 мм и более, для обеспечения работоспособности системы необходимо максимально возможное увеличение зазора при сохранении требуемого уровня эффективности передачи энергии и массогабаритных параметров ротора и статора. Увеличение дальности передачи можно достигнуть путем использования эффекта резонанса. Если катушка ротора и катушка статора будут настроены на одинаковую частоту, амплитуда электромагнитных волн увеличится даже при невысоком номинальном коэффициенте взаимосвязи. С этой целью в модуль электропитания (рис. 6) включен «автономный» резонансный инвертор (поз. 1), выполненный по традиционной схеме на базе катушек индуктивности, конденсаторов и IGBT-транзистора, а также блок электролитических алюминиевых конденсаторов компенсации непосредственно реактивного сопротивления обмоток ротора и статора. Использование магнитно-резонансной технологии позволило увеличить расстояние между ротором и статором до диапазона от 10 мм до 20 мм и обеспечить эффективность

системы беспроводной передачи электропитания в диапазоне от 98 % до 90 %. При увеличении расстояния между ротором и статором более 20 мм эффективность системы беспроводной передачи резко снижается.

Теоретически способность эффекта резонанса повышать эффективность передачи электропитания можно продемонстрировать следующим образом.

В общем случае, условие полного резонанса первичной и вторичной обмотки (когда каждый из контуров настроен в резонанс) можно представить как:

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} = f_0, \quad (9)$$

где: C_i – емкость цепи i -ой обмотки, равная $C_i = 1/(f_i^2 L_i)$.

При достаточно большой добротности контуров можно, что $f_i L_i \approx f_0 L_i$ и $f_i/f_0 = 1$.

Функцию резонансной кривой целесообразно (для наглядности) представить в относительных единицах как зависимость величины отношения I_2/I_{2p} от величины отношения f/f_0 , выразив через добротность (Q) и коэффициент взаимосвязи контуров (k):

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{f}{f_0} \cdot \frac{1 + (kQ)^2}{(1 - \nu^2 + (kQ)^2)^2 + 4\nu^2}, \quad (10)$$

где: I_2 – ток во вторичной обмотке;

I_{2p} – ток во вторичной обмотке при условии резонанса;

ν – величина, характеризующая ширину полосы пропускания на резонансных частотах, равная $\nu = Q \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$.

Откуда видно, что $I_2 < I_{2p}$.

Тогда, если $kQ < 1$, функция резонансной кривой будет иметь вид:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \nu^2) + 4\nu^2}} = \frac{1}{1 + \nu^2}, \quad (11)$$

Если принять, что $kQ = 1$, функция резонансной кривой будет иметь вид:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{2}{\sqrt{(1 - \nu^2 + 1)^2 + 4\nu^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \nu^4/4}}, \quad (12)$$

При сравнении (10) и (11) видно, что диапазон полосы пропускания между нижней и верхней границей при $kQ = 1$ шире, чем при $kQ < 1$, а при $kQ > 1$ – резонансная кривая приобретает два пиковых значения, а диапазон полосы пропускания еще более расширяется.

Максимальное значение тока во вторичной обмотке I_{2pmax} достигается при условии $R_i = f_0 M_{12}$ и $I_{2pmax} = U_1/(2R_i)$, где U_1 – напряжение в первичной обмотке, при настройке в резонанс совпадающее по фазе с током первичной обмотке I_{1p} .

Из выше сказанного видно, что оптимальная эффективность системы беспроводной передачи энергии может быть достигнута только на определенной резонансной частоте и при оптимальном сопротивлении нагрузки. При этом требуется очень точное согласование резонансных частот.

На сегодняшний день беспроводная зарядка уже не является чем-то супероригинальным или концептуальным. Существуют несколько стандартов такой передачи электроэнергии и несколько альянсов, продвигающих и развивающих технологии беспроводной передачи энергии, в том числе и на базе магнитно-резонансной технологии. Например, в спецификациях Консорциума беспроводной электромагнитной энергии (Wireless Power Consortium, WPC), разработавшего стандарт передачи энергии с помощью электромагнитной индукции на расстояние от 5 мм до 40 мм для портативных зарядных устройств – стандарт «Qi», рекомендуется выбирать резонансную частоту в диапазоне от 100 кГц до 205 кГц, в спецификациях PMA (Power Matters Alliance) – в диапазоне от 277 кГц до 357 кГц. В целом теоретически настройка резонансной частоты может осуществляться в диапазоне частот ближней зоны распределения электромагнитных волн, т.е. в диапазоне до 10 МГц.

Благодаря использованию в составе электронных модулей ротора и статора современных микро радиоэлектронных компонентов малого энергопотребления разработанная в рамках создания аппаратно-программного комплекса мониторинга система беспроводной передачи электроэнергии, исходно подсоединенная к питающей сети 24 В, в полной мере обеспечивает работоспособность всего измерительного комплекса.

Как уже говорилось ранее, измерение частоты вращения вала осуществляется бесконтактным датчиком на основе эффекта Холла, заключающегося в возникновении разности потенциалов при протекании постоянного тока через проводник, помещенный в постоянное магнитное поле, перпендикулярное его плоскости и направлению тока. Конструктивно датчик состоит из двух компонент: подвижной (в виде автономного изолированного постоянного магнита), интегрированной в состав одной из секций пояса ротора, и неподвижной (собственной катушки индуктивности), интегрированной в плату источника питания электронного блока статора. Обе составляющие соосно точно ориентированы друг относительно друга. При вращении вала в момент, когда оси магнита и катушки индуктивности совпадают, поток магнитной индукции в катушке возрастает и соответственно возрастает напряжение на выходе контура. При этом частота изменения напряжения пропорциональна частоте вращения вала.

Встроенное программное обеспечение электронного блока интерфейса позволяет осуществлять:

- настройку параметров функционирования аппаратуры системы и средств измерений (устанавливать значение напряжения на роторе; напряжения возбуждения тензорезистора; адреса, цикличность и объемы пакетов трансляции данных внешним потребителям в автоматическом режиме и т.д.);
- выполнение операций калибровки измерительных каналов непосредственно на судне (по месту установки);

- управление параметрами процессов измерений (устанавливать единицы измерений и диапазоны точности измеряемых параметров (число знаков после запятой); частоту дискретизации; диапазоны временных циклов усреднений и т.д.);
- регистрацию и обработку данных измерений, включая выполнение вычислительных операций по преобразованию значений выходных электрических параметров (пропорциональных значениям поверхностной деформации и частоте вращения вала) в значения величин крутящего момента, упора, скорости вращения и мощности на валу;
- визуализацию текущих данных в режиме on-line на мониторе оператора;
- формирование и сохранение баз данных фактических параметров функционирования системы и фактических данных измерений в виде журнала, согласно предварительно выбранного варианта его конфигурации и т.д.

С целью повышения уровня автоматизации судовых систем разработанный аппаратно-программный комплекс системы мониторинга может быть интегрирован непосредственно с системой управления ГЭД и с единой судовой системой электропитания судна.

При необходимости функциональные возможности комплекса могут быть расширены путем дополнения его средствами измерений, синхронно реализующими методы измерений параметров функционирования валопровода, основанные на других физических принципах. Например, дополнение комплекса вихретоковыми датчиками позволит осуществлять более точный бесконтактный контроль крутильных колебаний гребного и промежуточного вала. Установка трехкомпонентных вибропреобразователей (акселерометров) на корпус упорного подшипника валопровода и корпус ГЭД (в зонах носового и кормового подшипников и фундамента) позволит не только осуществлять непосредственно on-line мониторинг повышения параметров вибрации, вызываемое ледовыми нагрузками, но и диагностировать их техническое состояние по безразборной технологии. Одновременно могут контролироваться электрические параметры функционирования цепи возбуждения непосредственно самого ГЭД (посредством датчиков тока типа датчиков Холла) и параметры силовой цепи на входе (посредством стационарной установки датчиков тока типа Петля Роговского). Расширение состава измерительных каналов системы on-line мониторинга позволят не только осуществлять текущий контроль эффективности использования мощности ГЭД, но и точно выявлять причины и топологию возможных неисправностей.

Заключение

Разработка по созданию системы on-line мониторинга выполнена в рамках реализации ФЦП «Развитие гражданской морской техники». Опытный образец аппаратно-программного комплекса системы on-line мониторинга эффективности использования мощности синхронного ГЭД успешно прошел натурную апробацию на научно-экспедиционном судне «Академик Трешников»

класса Arc 7 (проект 22280 – изготовитель ОАО «Адмиралтейские верфи»; эксплуатирующая организация – ФГБУ «ААНИИ») в период рейса в ледовых условиях, соответствующих среднестатистическим ледовым условиям Баренцева моря в зимний период, показав свою работоспособность и целесообразность применения. Технорабочий проект системы on-line мониторинга прошел экспертизу и получил одобрение РМРС в обеспечение установки ее на судне (заключение № 120-019-ф/р-191928 от 02.07.2015 г.).

Научно-экспедиционное судно «Академик Трешников» оснащено двумя валопроводами, изготовленными по проекту «Admiralty» (разработчик – компания «Schottel», Германия) и двумя ГЭД типа NIMI80130D-320LNF (производитель – компания «ALCONZA BERANG, SL», Италия) с номинальной мощностью 7000 кВт каждый при частоте вращения 136 об/мин (30 об/мин – min; 177 об/мин – max). Валопровод судна включает гребной (длина – 15123 м; диаметр – 500 мм; максимально допустимый крутящий момент – 90 кНм); промежуточные валы (длина – 5197 м; диаметр – 430 мм) и упорный подшипник гребного вала типа LARRW50-500 (производитель – компания «RENK AG», Германия), рассчитанным на максимально допустимые крутящий момент – 70 кНм и осевое усилие – 802 кН. Судно оснащено двумя гребными винтами фиксированного шага диаметром 4400 м, (упор гребного винта – 243 кН при скорости переднего хода 18 узлов).

Тензометрические измерения производились на гребном валу в сечении диаметром 500 мм на расстоянии от торца ступицы гребного винта 11846 м. Мониторинг осуществлялся при различных условиях и режимах маневрирования судна: вход в поле сплошного торосистого однолетнего льда толщиной от 0,35 мм до 65 мм при глубине моря от 53 футов до 61 футов, боковом и встречном ветре скоростью от 5 м/с до 9,7 м/с; прохождение в полосе сплошного торосистого однолетнего льда толщиной от 0,35 мм до 65 мм при глубине моря от 27 футов до 57 футов, боковом и встречном ветре скоростью от 16 м/с до 24 м/с; а также при прохождении и маневрировании в полях битого льда. Скорость движения судна при вхождении в лед варьировалась в диапазоне от 1 узла до 6 узлов; при прохождении в полосе сплошного льда от 6 узлов до 12 узлов. Регистрация данных измерений (выходной сигнал с тензомоста – [мВ/В]; крутящий момент – [кНм]; осевое усилие – [кН]; скорость вращения – [об/мин]) осуществлялась в виде журнал-таблицы на режимах 5 выборок в секунду при точности регистрации исходных аналоговых сигналов [мВ/В] – 1×10^{-6} . Предварительно канал тензометрии калибровался по месту установки в режиме «на швартах» с последующей подстройкой «нуля» «ход вперед на чистой воде» по крутящему моменту, исходя из соотношения 1,825 мВ/В – 500 Нм. Измерения параметров движения судна (скорость; курс), а также параметров гидрометеорологической и ледовой обстановки осуществлялись и регистрировались посредством судовых систем навигации и метеонаблюдения. Все измерения производились по единой судовой шкале времени. Фактические данные мониторинга сравнивались с проектными данными ГЭД и элементов валопровода.

Анализ результатов мониторинга (рис. 8) показал, что на всех режимах движения судна максимальный фактический крутящий момент на гребном валу

в зоне контролируемого сечения не превышал максимально допустимого значения из условий прочности вала и допустимого значения крутящего момента на упорном подшипнике.

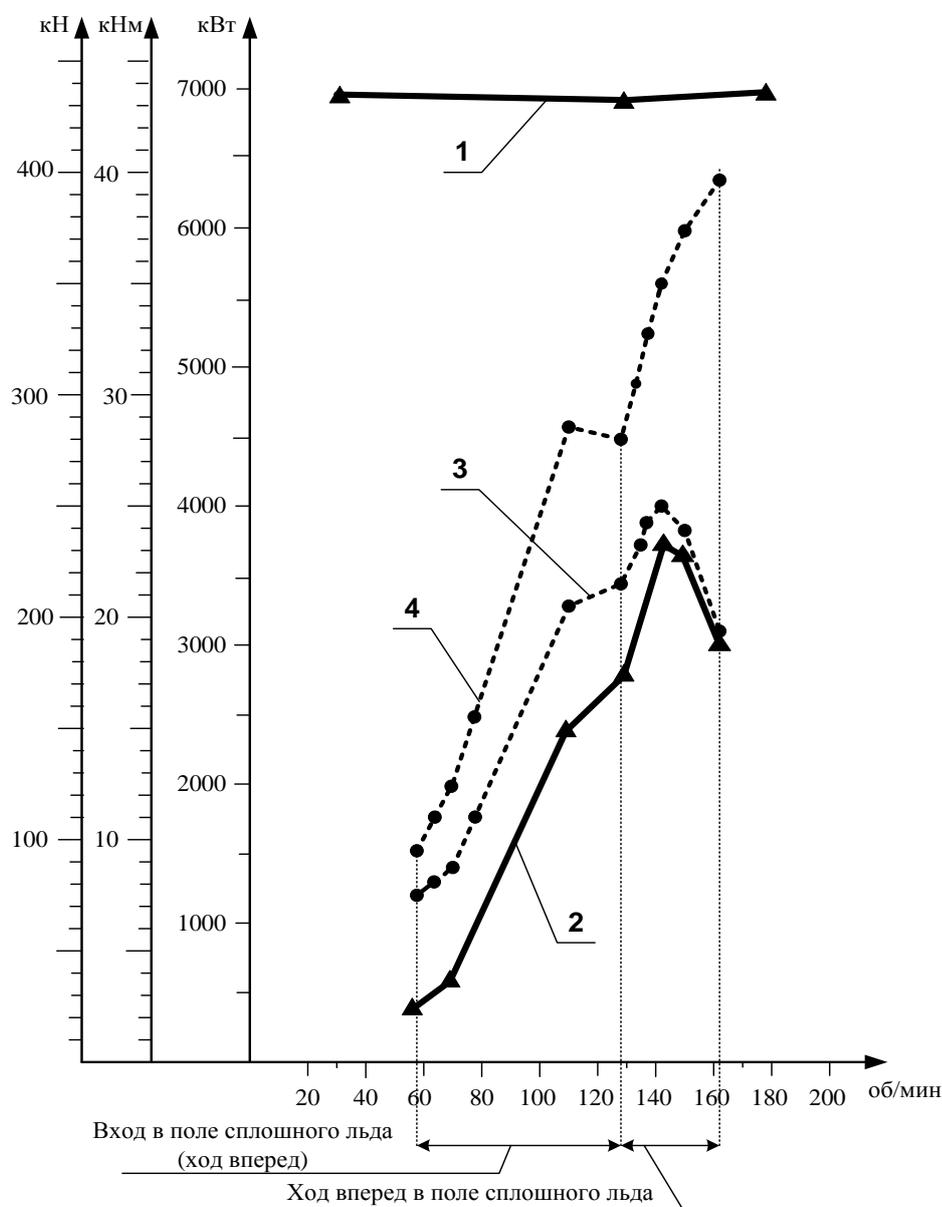


Рис. 8. Данные мониторинга, зафиксированные в процессе натурной апробации в зависимости от скорости вращения: 1 – проектные значения механической мощности ГЭД; 2 – фактические значения мощности на гребном валу в зоне контролируемого сечения; 3 – фактические значения крутящего момента в зоне контролируемого сечения гребного вала; 4 – фактические значения осевого усилия в зоне контролируемого сечения гребного вала

Однако соотношение проектных значений мощности на валу отбора мощности ГЭД и мощности на гребном валу в зоне контролируемого сечения даже в диапазонах установившихся режимов по частоте вращения для данного типа ГЭД (от 128 об/мин до 137 об/мин), обеспечивающих поддержание дви-

жения судна на скоростях от 10 узлов 12 узлов в ледовых условиях, свидетельствует о том, что полезная мощность составляет не более 50 % от проектного значения, что обусловлено резким снижением суммарного крутящего на валу за счет ледовой составляющей. При этом увеличение скорости вращения ГЭД с приближением к максимально значениям диапазона допустимых значений приводит к увеличению ледовой составляющей, снижению суммарного крутящего момента, передаваемого гребному винту и, как следствие, практически незначительному приросту скорости движения судна при одновременном увеличении осевой нагрузки на валолинию.

Одновременно осуществляемые измерения параметров вибрации на упорном подшипнике и ГЭД посредством дополнительно установленных шести трехкомпонентных пьезоакселерометров типа AP2071 и параметров крутильных колебаний гребного вала посредством двух вихретоковых преобразователей типа T10-G-КА, установленных в зоне контролируемого сечения гребного вала, зафиксировали резкое увеличение интенсивности данных процессов, что также свидетельствовало о нецелесообразности увеличения скорости вращения и нагрузок на ГЭД.

Полученные данные также показали, что в процессе проведения экспериментов аналогично нецелесообразным было и снижение скорости движения судна в условиях прохождения в поле сплошного льда за счет непосредственно занижения скорости вращения (что установлено на сегодня рядом рекомендаций по выбору режимов движения судна во льдах для судоводителей).

Таким образом, наличие оперативных данных on-line мониторинга позволило капитану в условиях проводимого эксперимента определить оптимальные режимы движения судна без создания необходимости увеличения ходового времени в период рейса и увеличения нагрузок на узлы и механизмы движительно-рулевого комплекса и единой судовой системы энергопитания, без повышения уровня риска их повышенного износа или возможных повреждений.

При эксплуатации научно-экспедиционного судна «Академик Трешников» в ледовых условиях, отличающихся от условий проведенного эксперимента в процессе испытаний опытного образца аппаратно-программного комплекса системы мониторинга, диапазон оптимальных режимов его движения, естественно, будет отличаться от зафиксированного в результате выполненных исследований.

С целью наработки статистической базы знаний, а также выявления возможной необходимости совершенствования созданного аппаратно-программного комплекса, включая алгоритм используемого интерфейса, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований в более широких фактически возможных диапазонах условий эксплуатации судов в акваториях Арктики и Антарктики. Увеличение интенсивности хозяйственной деятельности в Арктике, в том числе увеличение интенсивности судоходства, в последние годы и планирование дальнейшего ее увеличения на ближайшую перспективу, безусловно, ставит данное направление исследований в один ряд с другими актуальными и приоритетными прикладными исследованиями в обеспечение развития Арктического региона Российской Федерации.

Авторы благодарят капитана и экипаж научно-экспедиционного судна «Академик Трешников» за оказанную помощь при натурной апробации аппаратно-программного комплекса системы мониторинга.

Литература

1. Анисимов А. Н. Пропульсивный комплекс судов в условиях ледового плавания // Журнал университета водных коммуникаций. 2012. № 3. С. 175-184.
2. Романовский В. В., Лебедев А. И., Гостев А. Г. Качество электроэнергии гребных электрических установок судов ледового плавания и ледоколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2014. № 6 (28). С. 56-60.
3. Li Qin, Xincong Zhou, Yan Gao, Pengju Cao, Jianzhou Quan, Zhixiong Li. Shaft power measurement for marine propulsion system based on magnetic resonances // IEICE Electronics Express. 2012. Vol. 9. no. 15. С. 1260-1265. – URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/9/15/9_1260/_pdf/-char/en (дата обращения 02.07.2018).
4. Амелина М. А., Амелин А. С., Поляков М. В. Исследование эффективности магнито-резонансной системы беспроводной передачи энергии // Энергетика, Информатика, Инновации: сборник трудов VI Международной научно-технической конференции. Том 2. – Смоленск: Универсум, 2016. – С. 16-20.
5. Khmelnik S. I. The Energetics of Tesla Transformer // Mathematics in Computer Comp. 2012. BOX 15302. – Bene-Ayish: «MiC» – 52 p. – URL: <http://vixra.org/pdf/1310.0247v1.pdf> (дата обращения 02.07.2018).
6. Орхиментко В. Технология беспроводной подзарядки, часть 2 // Электронные компоненты и системы. 2014. № 12 (208). С. 11-19. – URL: <http://www.ekis.kiev.ua/contents.php?common=208> (дата обращения 03.07.2018).
7. Kurs A., Moffatt R., Soljagic M. Simultaneous Mid-range Power Transfer to Multiple Devices // Applied Physics Letters. 2010. № 96.4. С. 044102. – URL: <https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/76681> (дата обращения 02.07.2018).

References

1. Anisimov A. N. Propulsion complex of ships in the conditions of ice navigation. *Journal of the University of Water Communications*, 2012, no. 3, pp. 175-184 (in Russian).
2. Romanovsky V. V., Lebedev A. I., Gostev A. G. Quality of Electric Power of Rowing Electrical Installations of Ice Vessels and Icebreakers. *Vestnik of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*, 2014, no. 6 (28), pp. 56-60 (in Russian).
3. Li Qin, Xincong Zhou, Yan Gao, Pengju Cao, Jianzhou Quan, Zhixiong Li. Shaft power measurement for marine propulsion system based on magnetic resonances. *IEICE Electronics Express*, 2012, vol. 9, no. 15, pp. 1260-1265. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/9/15/9_1260/_pdf/-char/en (accessed 28 June 2018).

4. Amelina M. A., Amelin A. S., Polyakov M. V. Investigation of the efficiency of the magnetic resonance system of wireless power transmission. *Energy, Informatics, Innovations: collection of works of the VI International Scientific and Technical Conference*, vol. 2. Smolensk, Universum, 2016, pp. 16-20 (in Russian).

5. Khmelnik S. I. The Energetics of Tesla Transformer. *Mathematics in Computer Comp*, 2012, BOX 15302. Bene-Ayish, «MiC», 52 p. Available at: <http://vixra.org/pdf/1310.0247v1.pdf> (accessed 02 July 2018).

6. Orkhimento V. The technology of wireless charging, part 2. *Electronic components and systems*, 2014, no. 12 (208), pp. 11-19. Available at: <http://www.ekis.kiev.ua/contents.php?common=208> (accessed 03 July 2018) (in Russian).

7. Kurs A., Moffatt R., Soljacic M. Simultaneous Mid-range Power Transfer to Multiple Devices. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 4, no. 96, pp. 044102. Available at: <https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/76681> (accessed 02 July 2018).

Статья поступила 11 июля 2018 г.

Информация об авторах

Куркова Ольга Петровна – доктор технических наук. Профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Главный специалист по организации и планированию НИОКР. ОАО «Авангард». Область научных интересов: разработка автоматизированных информационно-измерительных систем. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Ефимов Владимир Васильевич – доктор технических наук, профессор. Директор по научной работе. ОАО «Авангард». Область научных интересов: разработка систем управления ракетно-космической техники. E-mail: v.v_efimov@mail.ru

Адрес: Россия, 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., дом 72.

On-line Monitoring System Power Efficiency of a Propulsion Motor when Operating Ships in Ice Conditions

O. P. Kurkova, V. V. Efimov

Problem statement and specific task. *The Problem of increasing the efficiency of the use of the power of a propulsion electric motor (PEM) in the operation of ships in ice conditions is one of the aspects of solving the complex problem of ensuring the safety and resource saving requirements for the operation of marine transport in the Arctic. Given that the ice impact on the ship is stochastic and difficult to predict, the problem of increasing the efficiency of the use of power of PEM can be solved by providing the skipper with operational data on the actual values of the loss of the useful power of PEM under various modes of motion of the vessel in real ice conditions. This information can be obtained by the skipper provided that the propulsion system (PS) of the vessel is equipped with an on-line monitoring system, the initial measured physical values of which are torque, axial force on the propeller shaft and its speed. The equipment of the system should have the minimum possible weight and size characteristics, not to create additional loads on the*

structural elements of the PEM and power supply system. The creation of such a system was made possible by the development of in the last decade of radio-electronic chip-components based on integrated circuits on crystals, as well as new research results in the field of magnetoelectronic. **The purpose of the work** is to develop a set of new technical solutions and create on their basis an experimental system for on-line monitoring of the efficiency of the use of PEM power in the operation of ships in ice conditions, testing of the prototype system in real conditions of operation of the ship in ice and development of recommendations for its use. **The methods and technologies used:** The solution of the problem of creating a complex system of on-line monitoring is based on the complex use of: methods of strain measurement of surface microdeformations and measurements of parameters of displacement on the basis of the Hall effect, followed by the calculation of the torque, axial force, power on a rotating propeller shaft; technology of wireless power transmission on the principle of magnetic-resonance induction and high-speed wireless data transmission via a digital two-way radiochannel. **Novelty:** The elements of novelty are the results of calculations' of the parameters and configuration of the interconnected circuits of magnetic induction and resonance; design and technological solutions of magnetically transparent and opaque " shield"; circuit solutions based on the modular principle, using integrated electronic chip-components; complex of algorithms for measurement system control interface and processing of measurement data. **Result:** The Prototype of the on-line monitoring system successfully passed the full-scale testing on the research-expedition ship "Academician Treshnikov" during the voyage in ice conditions, confirming its efficiency. **Practical significance:** The monitoring system is intended for the equipment of propulsion complexes of new ships of ice classes and ships that are already in operation.

Key words: electric propulsion of vessels, propulsion electric motor, effective power, shafting, torque, stop, thrust, ice resistance, torsional vibrations, speed, on-line monitoring, tensometry, technology of wireless power transmission, magnetic resonance induction, inductance circuit, Hall effect, rotor, stator, radio channel, transceiver, microcontroller, chip on the crystal, resonator, interface.

Information about Authors

Olga Petrovna Kurkova – Advanced Doctor of Engineering Sciences. Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Facilities. St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Chief-manager of the organization and planning department of R&D. JSC «Avangard». Field of research: development of information-measuring systems. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Vladimir Vasilievich Efimov – Advanced Doctor of Engineering Sciences, Professor. Director for scientific work. Field of research: development of control systems for rocket and space technology. E-mail: v.v_efimov@mail.ru

Address: Russia, 195271, Saint Peterburg, Kondratyevsky pr., 72.