

УДК 621.31

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ДОКОВ

Смыков Юрий Николаевич¹, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»

e-mail: sws1007@mail.ru

Горелов Сергей Валерьевич¹, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»

e-mail: sws1007@mail.ru

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. Статья посвящена поиску путей обеспечения высокого уровня энергоэффективности при электроснабжении электроэнергетической системы доков от береговых источников электрической энергии, с учётом изменения структуры, мощности и других электроэнергетических параметров потребителей. Рассматривается влияние показателей качества электрической энергии потребителей электрической энергии, в том числе в части появления и влияния кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения. Предложен ряд технических мероприятий, обеспечивающих высокий уровень энергоэффективности и высокие эксплуатационные показатели.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, электронная генерация, кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха; электромагнитная совместимость.

WAYS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY IN POWER SUPPLY TO DOCKS

Yuri N. Smykov¹, Associate Professor of the Department of «Electric Power Systems and Electrical Engineering»

e-mail: sws1007@mail.ru

Sergey V. Gorelov¹, Professor of the Department of «Electric Power Systems and Electrical Engineering»

e-mail: sws1007@mail.ru

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article is devoted to finding ways to ensure a high level of energy efficiency in the power supply of the dock power system from coastal sources of electric energy, taking into account changes in the structure, capacity and other electric power parameters of consumers. The influence of the quality indicators of electric energy of consumers of electric energy is considered, including in terms of the occurrence and influence of conductive low-frequency electromagnetic

interference on the voltage drop. A number of technical measures are proposed to ensure a high level of energy efficiency and high operational indicators.

Keywords: energy efficiency, energy saving, electronic generation, conducted low-frequency electromagnetic interference; electromagnetic compatibility.

Современный док — это высокотехнологичное плавучее инженерное сооружение, от качественной работы которого зависит развитие больших воднотранспортных комплексов и развитие ключевых проектов, например Северного морского пути. В процессе проектирования и эксплуатации доков и доковых комплексов решается большое количество научно-технических задач. В том числе повышение энергоэффективности, повышение уровня энергосбережения, снижение количества загрязняющих веществ, попадающих в воздух, почву и воду, повышение экономических показателей эксплуатации судов, диверсификация рисков срыва северного завоза, безопасность судоходства, возможность обеспечить техническую поддержку водному транспорту всех служб и ведомств государства. Однако строительство доков и доковых комплексов требует больших капиталовложений, при длительном сроке окупаемости, что ограничивает рост количества вводимых в эксплуатацию новых объектов данного типа. Так средний срок службы плавучих доков IV группы, имеющих грузоподъёмность от 12 000 до 25 000 тонн, уже приближается к расчётному значению — 50 лет.

Оборудование дока востребованное в современных условиях эксплуатации и ремонта судов получило существенную линейку различных электротехнических устройств повышающих производительность труда и культуру производства, например значительно снизилась стоимость установок лазерной резки металла и соответственно произошло повсеместное применение указанных установок, что учитывая точность и скорость обработки металла позволит снизить сроки ремонта судов, а значит обеспечит возможность заблаговременного выхода в рейс и получение прибыли судовладельцем. На ряду с установкой лазерной резки интерес представляет применение электролизёров для получения необходимого количества востребованного газа, 3D принтеров для создания пластиковых и металлических объектов, дронов с электроснабжением от дока(например с целью покраски), грузовых подъёмных механизмов высокой мощности , в том числе грузовых и пассажирских лифтов для быстрого и комфортного перемещения специалистов, материалов и оборудования к месту осмотра или ремонта и так далее. Кроме это существенный рост увеличения мощности потребления вызывает и увеличение количества электрооборудования обеспечивающего достойные условия эксплуатации и обслуживания ,как для оборудования так и для персонала, например установка в электрических шкафах микроконтроллеров, для управления температурой внутри шкафа, применение кондиционеров с целью создания комфортной температуры для персонала, развитая система очистки воздуха и вентиляции помещений и т.д. Поэтому мощность, потребляемая современным доком или доковым комплексом, может превышать несколько МВт высококачественной электрической энергии. Независимо от степени автономности проектируемого дока обязательна возможность приёма электроэнергии с берега.



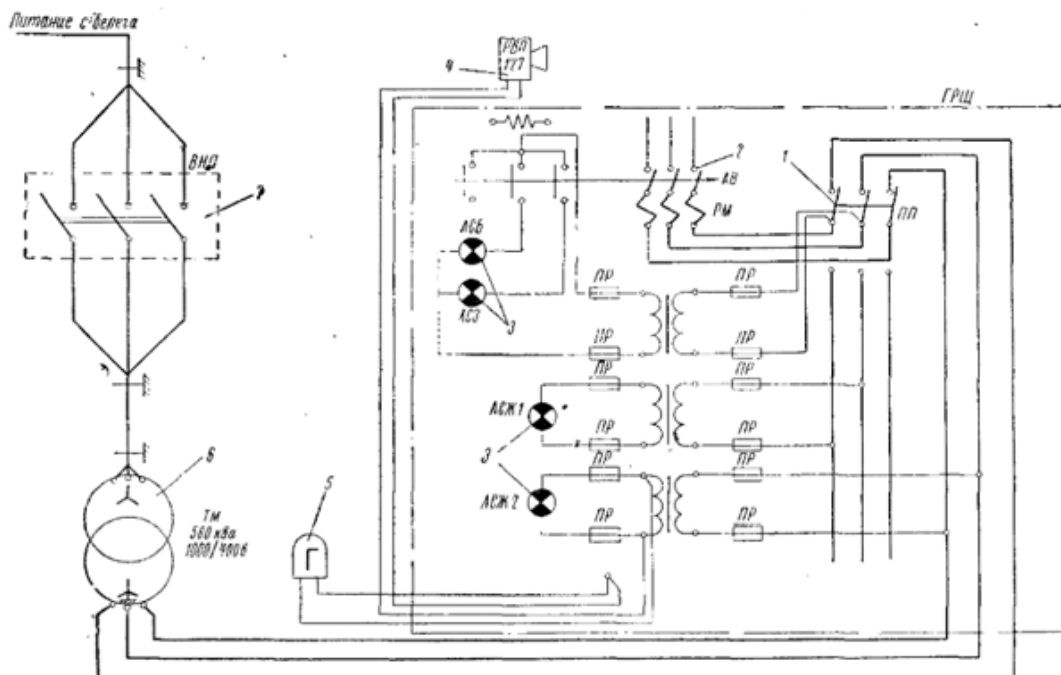


Рисунок 1 – Схема высоковольтной установки:

- 1 — переключатель питания с берега с 10 000 в на 380 в; 2 — установочный автомат;
3 — сигнальные лампы; 4 — реверсивный переключатель; 5 — реле газовое; 6 — трансформатор 10 000/400 в;
7 — выключатель нагрузки

Рассмотрим схему замещения.

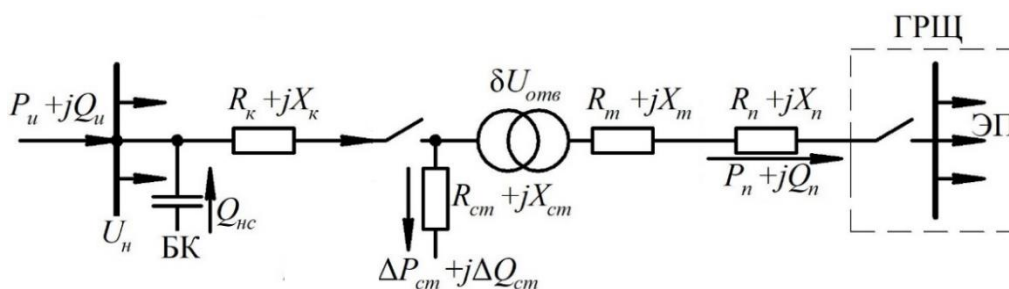


Рисунок 2 – Схема замещения фидера электропередачи «берег – судно»

где R_k , R_m , R_n ; X_k , X_m , X_n — соответственно, активные и реактивные сопротивления кабеля 10 кВ, трансформатора и штатного кабеля 0,4 кВ, Ом;

ΔP_{cm} , ΔQ_{cm} — потери активной и реактивной мощности в стали трансформатора, Вт, В·Ар;

U_n — напряжение источника питания, В;

P_u , Q_u — активная и реактивная мощности, поступающие от источника питания в судовую электрическую сеть, Вт, В·Ар;

P_n , Q_n — активная и реактивная мощности судовых электроприемников, В·Ар;

R_{cm} , X_{cm} — активные и реактивные сопротивления, характеризующие соответствующие потери мощностей в стали трансформатора, Ом;

$\delta U_{отв}$ — добавка напряжения на трансформаторе 10/0,4 кВ, В;

$Q_{нс}$ — реактивная мощность конденсаторной батареи, В·Ар;

БК – батарея конденсаторов, установленная на высоком напряжении в береговой электрической сети.

Исходя из схемы замещения необходимо рассмотреть следующие пути повышения энергоэффективности. Снижение перетоков реактивной мощности, в том числе за счет использования конденсаторных батарей, кроме этого интерес представляет использование судовых валогенераторов с расцепленной муфтой в качестве синхронных компенсаторов, при длительной стоянки в порту, использование береговых синхронных компенсаторов - генераторов с возможностью покрытия дефицита мощности в условиях пиковой нагрузки, тем самым стабилизировать электроэнергетические параметры энергосистемы. Далее следуют потери в трансформаторе, с целью снижения данных потерь разрабатываются как новые технологии, например применение сверхпроводников, так и классические способы, например вариативное подключение количества трансформаторов одинаковой или разной мощности, что в условиях развитой микропроцессорной техники является достаточно перспективным направлением. Следующим элементом является кабельная линия, для снижения потерь в которой и повышения эксплуатационных качеств требуется изучение международного опыта и составление специального перечня - стандарта для кабельной продукции, используемой при электроснабжении плавучих инженерных сооружений с берега. Например, береговая линия, как правило содержит песок, который является абразивом, прокладывание кабельных линий происходит перманентно, в том числе с изгибами и прокладыванием кабеля со значительной массой в неподготовленной местности, поэтому интерес представляет использование отожжённой меди в качестве проводника электрической энергии, по примеру опыта Финляндии. Следующим элементом схемы замещения является ГРЩ, в качестве путей развития и повышения энергоэффективности которого интерес представляет секционирование потребителей по уровню восприимчивости к качеству электрической энергии, например нагревательные приборы используемые в осенне-весенний период наименее требовательны к качеству электрической энергии и т.д. Исходя из этого, например, возможно применение двух кабельных линий, с высококачественной электроэнергией и электроэнергией общепромышленного качества (ГОСТ 32144-2013).

Одним из условий применения современных электротехнических устройств является более высокие требования к качеству электрической энергии, вызванное как эксплуатационными издержками, так и финансовыми. Например, провалы напряжения в береговых электрических сетях длительностью 20...50 мс могут приводить к ущербу в десятки и даже сотни миллионов рублей за одно нарушение [5]. Для доков сумма ущерба несколько меньше, однако замена оборудования и его доставка к месту эксплуатации может иметь ограничения по времени. Соответственно суда в ожидании ремонта находятся в режиме простоя, а судовладельцы терпят значительные убытки и срыв сроков поставки грузов, что особенно важно для удаленных территорий, где навигация ограничена по времени.

При этом нормы показателей качества электроэнергии в электрических сетях согласно требованиям ГОСТ 32144-2013, в части указанной помехи, распространяются вне зависимости от системы электроснабжения и определяются следующими показателями [6]:

1. Провал напряжения δU_{Π} – ниже 90%
 2. Длительность провала напряжения Δt_{Π} – до 1 мин
- Появление данного вида помех, имеет различную природу, а именно:
1. Возникновение коротких замыканий.
 2. Срабатывание коммутационной и защитной аппаратуры
 3. Действие АПВ
 4. Не корректные схемные решения



5. Плановые и внеплановые переключения
6. Подключение электропривода большой мощности
7. Дефекты электрооборудования и средств автоматики.

Вопросам повышения качества функционирования электропередачи «берег - судно» рассмотрены в отечественных [1-3] и зарубежных работах [4], однако рассмотрение электроэнергетических систем доков, влияние качества электрической энергии, в том числе кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения рассмотрено недостаточно глубоко. За последние десятилетия особенно остро проявляются вопросы межфакторного взаимодействия снижения показателей качества электрической энергии. Так при наличии гармонических составляющих в сети, высокого уровня несимметрии с одновременным возникновением детерминированного провала напряжения происходит консолидация негативного воздействия.

С целью дальнейшего анализа рассмотрим предусмотренные защиты от ЭМП по провалу напряжения, расположенные на судне, а именно устройство защиты от обрыва фазы и снижения напряжения береговой сети (ЗОФН). Устройства рассматриваемого типа рассчитаны таким образом, чтобы не происходило ложных срабатываний при возникновении следующих отклонений от нормального состояния в сети: симметричных (трехфазных) и несимметричных (двухфазных и однофазных) коротких замыканий; несимметрия токов нагрузки, достигающих до 25%; набросов любой нагрузки (по величине и характеру) и сбросов нагрузки до нуля; кратковременных колебаний напряжения от -25 до +13% и частоты тока от -6 до +4% относительно номинальных значений. В указанных случаях допускается кратковременное включение сигнализации о понижении напряжения.

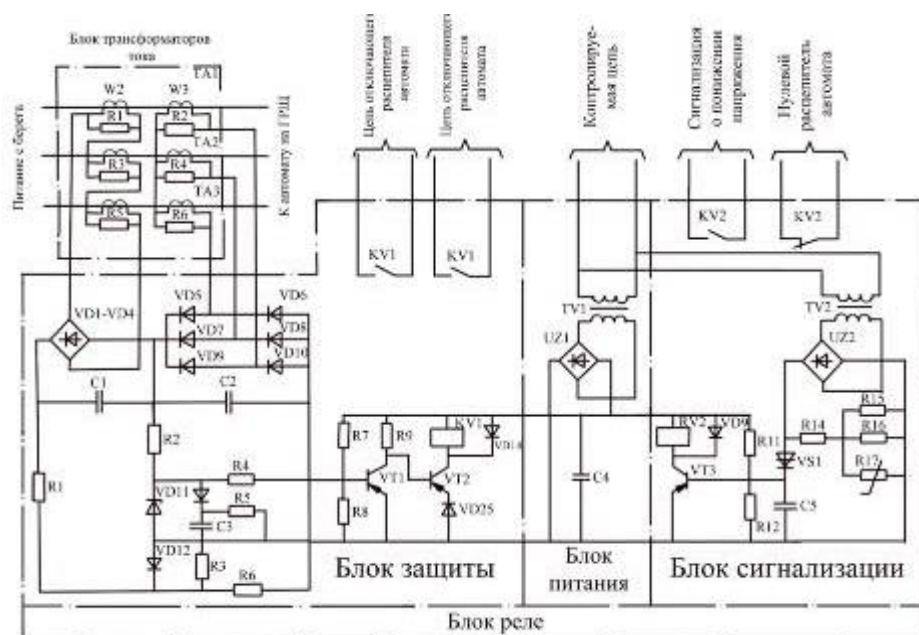


Рисунок 2 – Принципиальная схема ЗОФН

На рисунке 2 представлена принципиальная схема ЗОФН, где вторичные обмотки w_2 включены последовательно, поэтому обеспечиваются выделение и суммирование гармонических составляющих, кратных трём, которые воздействуют на измерительную часть схемы блока реле, контролирующую исправность фаз. Вторичные обмотки w_3 соединены по схеме «звезда» и включены на исполнительную часть, дающую сигнал при обрыве фазы.

Однако вопрос переключения на судовые источники питания, в части зависимости время отключения – остаточное напряжение остаётся актуальным.

От коротких замыканий подводящий кабель защищён защитой береговой сети. От междуфазных коротких замыканий высокого напряжения трансформатор защищают высоковольтные предохранители, а от однофазных и витковых замыканий внутри трансформатора и одновременно от перегрузки — газовое реле, работающее на звуковой сигнал. Попадание высокого напряжения на обмотку низкого напряжения (при пробое высокого напряжения нулевой точки обмотки низкого напряжения) предупреждается заземлением на корпус. Чтобы предотвратить одновременную подачу питания на шины ГРЩ от дизель-генератора и высоковольтного трансформатора или от береговой сети напряжением 380 в, в схеме ГРЩ предусмотрены промежуточные реле РП1 и РП2 и управляющие катушки автоматов АВ и АС.

Таблица 1 – Сравнение требований ГОСТ 32144-2013 и требований ПСВП РРР к показателям качества электроэнергии

Показатель качества электроэнергии	Обозначение по ГОСТ 32144-2013	Требования ГОСТ 32144-2013		Требования ПСВП РРР		
		Нормально допустимое значение	Предельно допустимое значение	Длительное	Кратковременное	Время кратковременного отклонения, с.
Медленные изменения напряжения	$\delta U_m(+)$ $\delta U_m(-)$	-	$\pm 10\%$	+6% -10%	+15% -30%	1,5
Перенапряжение	-	-	свыше 110%	-	-	-
Кратковременная доза фликера	PSt	-	1,38%	-	-	-
Длительная доза фликера	PLt	-	1%	-	-	-
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения	KU	8%	12%	-	10%	-
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной и несимметрии напряжений по нулевой последовательности	K2U; K0U	2%	4%	-	-	-
Отклонение частоты	δf	0,2Гц	0,4Гц	5%	10%	5
Провал напряжения		-	ниже 90%	-	ниже 75%	-
Длительность провала напряжения	δt_{np}	-	60 с	-	-	1,5

В шахматах существует такое понятие как чистота цели хода (манёвра) — это эстетическое требование в задаче, вытекающее из принципа экономичности средств.

Чистота цели развития Северного морского пути указывает на необходимость создания соответствующей береговой инфраструктуры, в которую входит обеспечение чистой пресной водой, качественными продуктами питания и т.д. с одной стороны и техническая обеспеченность с другой стороны. Под технической обеспеченностью подразумевается



обеспечение необходимым количеством судов технического флота, диверсификация каналов электроснабжения, например наличие плавучих модулей электроснабжения судов с использованием в качестве первичных двигателей газовых машин (использование СПГ внутри страны крайне актуальная задача с точки зрения экономического и экологического эффекта), наличие необходимо количества доковых комплексов с современным оснащением. Под современным оснащением подразумевается применение частотного, электропривода, систем управления с использованием микропроцессоров, станков ЧПУ и плазменной резки и другого востребованного в процессе ремонта, и эксплуатации оборудования. Таким образом требования к качеству электрической энергии возрастают, а значит и системы, обеспечивающие защиту, требуют индивидуализированной настройки в зависимости от проекта судна, интегральных показателей береговой электрической сети и т.д. Результаты работы послужили основой для обоснования и создания характеристики защиты «время – остаточное напряжение» с использованием динамической уставки по времени срабатывания. С целью обеспечения физической основы указанной защиты, полученные математические расчёты заложены в алгоритм работы программы программируемого логического контроллера ПЛК 110-24.30.P-M (фирма производитель Овен). Программа выполнена в среде разработки CoDeSys Version 2.3.9.41 на языке непрерывных функциональных схем CFC. Полученная программа органически вливается и дополняет сценарии использования **Smart Grid** ("интеллектуальные сети электроснабжения"), позволяет расширить спектр решаемых задач и обеспечить высокие показатели энергоэффективности и энергосбережения, например «система управления комплексом электроснабжения судов с берега» [7].

Вывод

С учётом значительного износа существующих доков и прилегающих к ним объектов, так срок службы указанных плавучих инженерных сооружений приближается к нормативному и в среднем составляет около 50 лет, то возникает пересечение двух линий тренда. Соответственно, первая линия тренда - увеличение среднего срока службы. Вторая линия тренда - увеличение установленной мощности потребителей дока и доковых комплексов, а именно количество и мощность потребителей имеет высокую динамику в сторону увеличения, например активная установка систем вентиляции и кондиционирования в последние десятилетия и другое (станки плазменной резки, увеличения количества грузоподъёмных механизмов) О данном тренде свидетельствует развитие электроэнергетики в целом и сравнительное повышение номинального напряжения применяемого на судах (системы high voltage) Повышение мощности потребителей имеет средний прирост 1% в год, таким образом при проектировании современного дока его потребляемая мощность значительно вырастет, прирост составит около 50%. Таким образом пересечение двух указанных выше линий тренда говорит о необходимости проектирования электроэнергетической системы доков и доковых комплексов с учетом следующих путей повышения энергоэффективности и уровня энергосбережения:

1. Применение совместно с береговым электроснабжением систем электронной генерации, получающих питание от возобновляемых источников питания.
2. При длительных простоях дока значительного водоизмещения необходима проработка аспектов эксплуатации его в качестве гидроаккумулирующей электростанции, или пиковой гидроаккумулирующей электростанции.
3. Произвести категорирование сетей по кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения. Это необходимо с целью ухода от обработки большого количества данных к простой структуре категорий. Категорирование



учитывает следующие аспекты: частота провалов напряжения, математическое ожидание глубины провала напряжения, величина глубины провала напряжения, вероятность появления провала напряжения, математическое ожидание длительности провала напряжения. На основе информации о категории береговой сети принимается обоснованное решение о возможности подключения электроэнергетической системы дока к береговой сети или о возможности подключения после значительного улучшения категории сети.

4. Глубокий анализ и предложения к изменениям в нормативные документы, в части подключения и электроснабжения доков и доковых комплексов от береговой сети. В том числе ограничения по подключению к сетям с низкой категорией по кондуктивным низкочастотным электромагнитным помехам по провалу напряжения.

5. Использование двухфидерной независимой электропередачи «берег - судно» с целью разделения систем электроснабжения ответственных потребителей и особо ответственных потребителей.

6. Использование сухих трансформаторов с литой изоляцией обмоток, с целью минимизации рисков электропожаробезопасности и упрощению систем автоматизированного мониторинга и контроля параметров электроэнергетической системы дока и упрощению удалённого управления, что особенно важно при развитии значительно удалённых от централизованного электроснабжения районов страны, а также в зимний период работы.

7. Повышение качества электрической энергии, как при электроснабжении доков с берега, так и от автономной системы электроснабжения. Применение фильтрокомпенсирующих устройств, систем упреждающего регулирования напряжения сети при детерминированных провалах напряжения, применение систем накопления электрической энергии для демпфирования пиковой нагрузки и т.д.

Список литературы:

1. Смыков Ю.Н. Оптимизация системы электроснабжения судна с берега В сборнике: Россия молодая. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Редакционная коллегия: Костюк Светлана Георгиевна отв. редактор, Останин Олег Александрович, Хорешок Алексей Алексеевич, Дворовенко Игорь Викторович, Кудреватых Наталья Владимировна, Черкасова Татьяна Григорьевна,

2. Сальников В.Г., Смыков Ю.Н., Барков Д.А., Васильев С.М. Сохранение устойчивости судовой электроэнергетической системы при питании судна с берега.// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 160-163.

3. Смыков Ю.Н. Аспекты повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 17-23.

4. Ström L., Bollen M., Kolessar R. Voltage Quality Regulation in Sweden. [Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6–9 June, 2011; Paper 0168] [Electron. Resurs] <https://cired.net/publications/cired2011> (Data of appeal 10.12.2022).

5. Ершов С.В., Пигалов М.С. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12-1. С. 95-104.

6. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ). – М., Стандартинформ, 2014. – 16 с.



7. Переладов М.Е. Смыков Ю.Н. Система управления комплексом электроснабжения судов с берега / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610299, 11.01.2022

