

*Мехтиев Г.А., Исмаилов С.С.*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ СИНХРОННЫХ ВАЛОГЕНЕРАТОРОВ НА СУДАХ С ВРШ**

*В статье рассматривается применение валогенераторных установок (ВГУ) на современных судах. Приведены разновидности ВГУ и их экономический эффект. Основное внимание уделено валогенераторным установкам, применяемым на судах с винтом регулируемого шага (ВРШ). Даны основные параметры асинхронизированного синхронного генератора, указаны его преимущества и недостатки. Приведена упрощенная схема лабораторного стенда ВГУ с асинхронизированным синхронным генератором, где в качестве асинхронизированного синхронного генератора применен асинхронный двигатель с фазным ротором, в качестве главного двигателя применен регулируемый двигатель постоянного тока.*

***Ключевые слова:** валогенератор, судно, асинхронизированный синхронный генератор, главный двигатель, преобразователь частоты, винт регулируемого шага.*

**Постановка проблемы.** В настоящее время повышение экономичности судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) осуществляется с использованием мощности главных двигателей для производства электрической энергии. Применение валогенераторов на судах позволяет уменьшить себестоимость электроэнергии и снизить эксплуатационные расходы.

Валогенераторные установки установлены на большинстве судов современной постройки. Ведущие судостроители по-разному решают проблему стабилизации частоты тока и напряжения валогенераторных установок. В связи с этим на современных судах находят применение валогенераторные установки различных типов, в том числе и валогенераторные установки с асинхронизированным синхронным генератором. Последние из этих типов имеют большие преимущества для судов с винтом регулируемого шага.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Общее признание в этом направлении получили работы О.С. Хватова, А.В. Григорьева, В.А. Петухова, А.А. Иванова, Ю.Д. Зубкова, С.К. Бохьяна, В.И. Радина, Н.Д. Торопцева, А.В. Новикова и др. В приведенных работах рассмотрены формирование предложений по модернизации уже находящихся в эксплуатации установок с целью оптимизации режимов их эксплуатации, разработка ВГУ нового поколения. Даны описания основных типов ВГУ с постоянной и переменной частотой вращения валогенератора (ВГ). Рассматриваются основные способы стабилизации напряжения и частоты, конструкция и принцип действия ВГУ, основные режимы эксплуатации ВГУ с синхронным ВГ и полупроводниковым преобразователем.

На основе теоретических и экспериментальных исследований изучен вопрос работы ВГ на судах с ВРШ с переменной частотой вращения, а также возможность реализации двигательного режима эксплуатации установки данного типа.

**Цель исследования.** Исследование процесса регулирования выходного напряжения и частоты генератора методом изменения его скорости вращения с изменением частоты тока ротора.

**Изложение основного материала.**

**Общие сведения о валогенераторных установках судов с ВРШ.** В настоящее время валогенераторные установки устанавливаются на большинстве судов современной постройки. Одним из основных показателей, доказывающих целесообразность применения

валогенераторных установок (ВГУ) в составе судовой электроэнергетической системы (СЭЭС), является уменьшение себестоимости электроэнергии в среднем на 15÷20% [1, 2, 3]. Как известно, ВГУ находят применение как на судах, где в качестве движителя используется винт регулируемого шага (ВРШ), так и на судах с винтом фиксированного шага (ВФШ). Валогенераторные установки на судах с ВРШ являются наиболее распространенными на морском флоте. На судах с ВРШ и валогенераторной установкой применяют два способа управления главными двигателями (ГД):

- 1) управление ГД по валогенераторной характеристике. В данном варианте скорость судна регулируется изменением шага винта, частота вращения ГД при этом остается постоянной;
- 2) управление ГД по комбинаторной характеристике. В этом варианте скорость судна изменяется одновременным регулированием шагового отношения и частоты вращения винта.

Комбинаторный способ управления экономичен, однако в этом случае необходимо отключать ВГ, так как частота вырабатываемой электроэнергии будет изменяться. Следует отметить, что в настоящее время ВГУ на судах с ВРШ работают в основном с постоянной скоростью вращения. Они проще по конструкции, обладают высоким КПД и хорошими массогабаритными показателями. Однако эффективность энергетической установки еще можно увеличить, если при уменьшении нагрузки главного двигателя одновременно изменять угол поворота лопастей ВРШ, т.е. поддерживать оптимальное соотношение частоты вращения и шага винта. При таком управлении снижается расход горюче-смазочных материалов и экономический эффект на судах с ВРШ еще может увеличиваться до 20% [4]. Для достижения такого экономического эффекта на судах с ВРШ и ВГУ необходимо при регулировании скорости вращения ГД стабилизировать частоту тока валогенератора (ВГ). Стабилизацию частоты тока ВГ можно осуществить с применением планетарных передач или полупроводниковых преобразователей (ПП) частоты. Однако эти стабилизирующие элементы увеличивают вес и габарит ВГУ, уменьшают его КПД и усложняют обслуживание установки.

Последние годы много пишут о целесообразности применения валогенераторных установок на судах с ВРШ асинхронизированных синхронных генераторов [2, 4, 5, 6].

**Асинхронизированный синхронный валогенератор.** Асинхронизированная синхронная машина (АСМ) представляет собой по конструкции асинхронную машину с фазным ротором, которая имеет симметричную трехфазную обмотку возбуждения, располагающуюся на роторе. Обмотка возбуждения АСМ получает питание от источника переменного тока.

Частота электроэнергии вырабатываемой асинхронизированным валогенератором определяется следующим образом [2, 4]:

$$\omega_{ВГ} = \omega_p \pm \omega_B, \quad (1)$$

где  $\omega_{ВГ}$  - угловая частота напряжения ВГ;

$\omega_p$  - угловая частота вращения ротора ВГ;

$\omega_B$  - угловая частота напряжения в обмотке возбуждения ВГ.

При изменении скорости вращения главного двигателя (комбинаторный режим работы) поддержание постоянства частоты вырабатываемой электроэнергии в асинхронизированном валогенераторе осуществляется путем изменения частоты тока в обмотке возбуждения. При этом поддержание постоянства напряжения в сети осуществляется за счет изменения величины тока в обмотке возбуждения АСМ.

Если пренебречь потерями в обмотках АСМ, то мощность, снимаемая со статорной обмотки ВГ, определяется следующим образом [4]:

$$P_{ВГ} = M\omega_c = M(\omega_p \pm \omega_c) = P_p \pm P_{\text{воз}}, \quad (2)$$

где  $M$  – момент на валу ВГ;

$\omega_c$  - угловая частота магнитного потока;

---

---

$P_p$  – мощность на валу ВГ;

$P_{воз.}$  - мощность в цепи возбуждения АСМ.

Из уравнения (2) можно получить зависимость мощности обмотки возбуждения от скольжения АСМ.

$$P_{воз.} = P_{ВГ} \cdot S \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3) мощность цепи возбуждения асинхронизированных валогенераторов пропорциональна скольжению и увеличивается с уменьшением частоты вращения валогенератора. На судах ВРШ и ВГ при работе по комбинаторной характеристике в большинстве времени диапазон изменения частоты вращения ГД находится в 30% от номинальной частоты вращения. Поэтому считают целесообразным рассчитывать систему возбуждения и ПП всего лишь на 15% от номинальной мощности ВГ. При этом за номинальную частоту вращения ВГ следует выбирать  $n_{ВГ} = 0,85n_{ГД}$ , где  $n_{ГД}$  - номинальная частота вращения главного двигателя.

Для судов с винтом регулируемого шага (ВРШ) и валогенератором (ВГ) с ограниченным пределом регулирования частоты тока (до 15%) асинхронизированный синхронный генератор имеет нижеуказанные преимущества перед синхронным генератором с преобразователем частоты звеном постоянного тока в цепи статора, а именно:

- установка полупроводникового преобразователя частоты в цепи обмотки возбуждения, что снижает мощность, стоимость и габариты преобразователя;
- высокое качество вырабатываемой электроэнергии;
- способность ВГУ вырабатывать как активную, так и реактивную мощность;
- реализация ВГУ автономного режима работы, параллельной работы с ДГ и двигательного режима работы ВГ;
- высокий КПД установки.

В качестве достоинства ВГУ с асинхронизированным синхронным генератором также необходимо отметить, что при сильном волнении моря, при значительном изменении частоты вырабатываемой ВГ электроэнергии, валогенератор можно не отключать, так как его частоту можно поддержать постоянной с помощью преобразователя частоты включенного в цепь ротора.

Основным недостатком ВГУ с АСМ является применение электрической машины специального исполнения.

Для экспериментального исследования в Азербайджанской Государственной Морской Академии на кафедре электрооборудование судов создан лабораторный электротехнический стенд ВГУ с АСМ. На рис. 1 показана модель лабораторного стенда. На основе множественных экспериментов получены натурные кривые изменение напряжения, изменяющиеся во времени.

Потребителями электрической энергии АСМ являются 3-фазная активно-индуктивная нагрузка, коэффициент мощности которой приблизительно равен 0,8.

Основной целью данного экспериментального исследования является определение степени искажения формы кривой выходного напряжения асинхронизированного синхронного генератора при изменении частоты вращения ротора на 15% от номинального.

На рис. 2 показаны полученные с осциллографа мгновенные значения напряжения на зажимах асинхронизированного генератора (асинхронного двигателя с фазным ротором) полученного на лабораторном стенде.

На рис. 2а показаны мгновенные значения напряжения при синхронном режиме асинхронизированного генератора ( $n_p = n_n$ ) когда обмотка возбуждения питается постоянным током. На рис. 2б показано мгновенное значение напряжения того же генератора при уменьшении скорости вращения ротора на 5% ( $n_p = 0,95n_n$ ), коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 2,1 %. На рис. 2в показано мгновенное значение напряжения генератора при уменьшении скорости вращения ротора на 10%

( $n_p = 0.9n_n$ ), коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 4,8 %. На рис. 2г показано мгновенное значение на зажимах генератора при уменьшении скорости вращения ротора на 15 % ( $n_p = 0.85n_n$ ), коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 5,9 %.

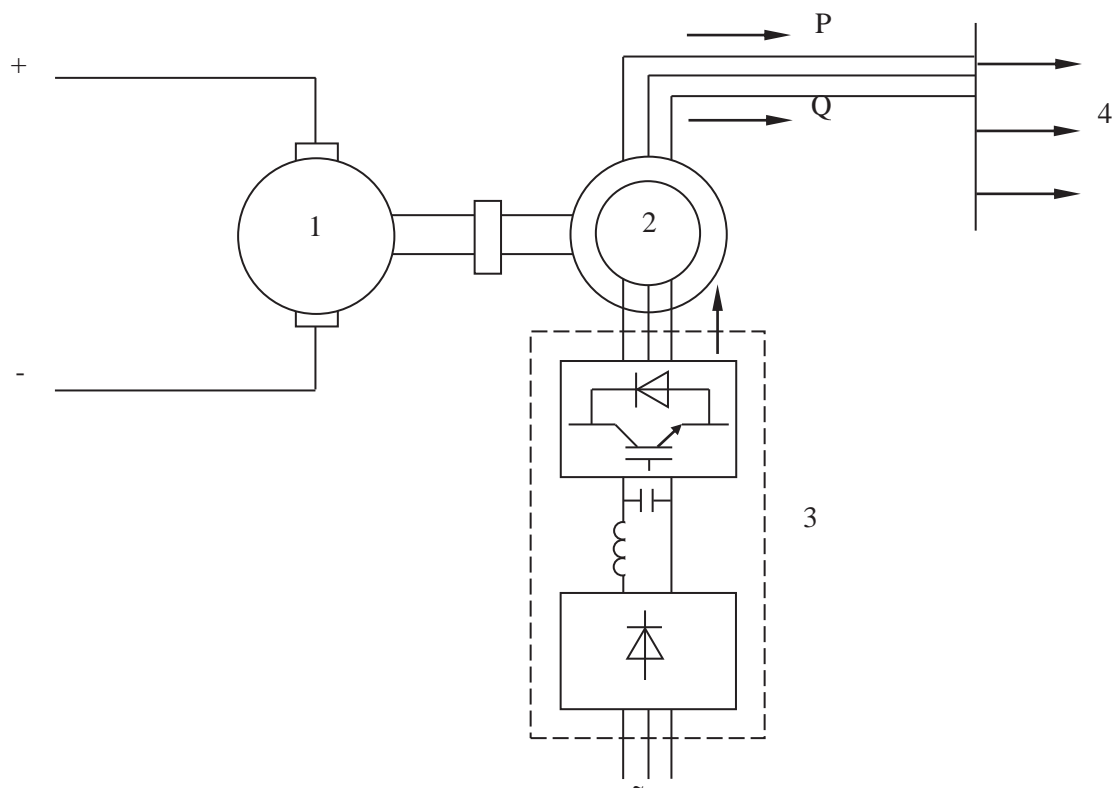
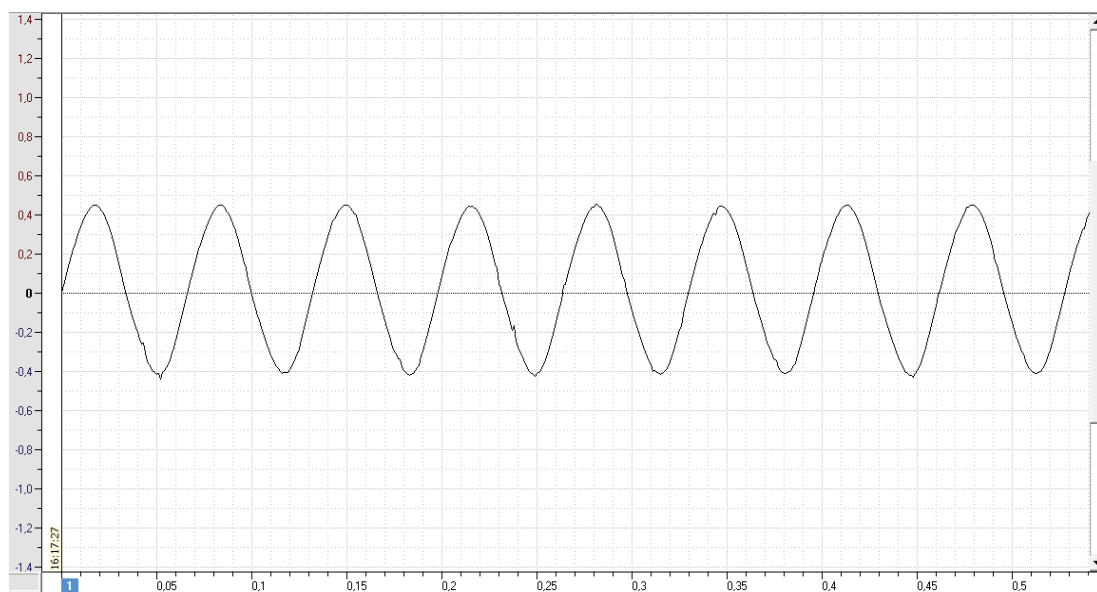


Рис. 1. Упрощенная схема лабораторного стенда ВГУ с АСМ [5]

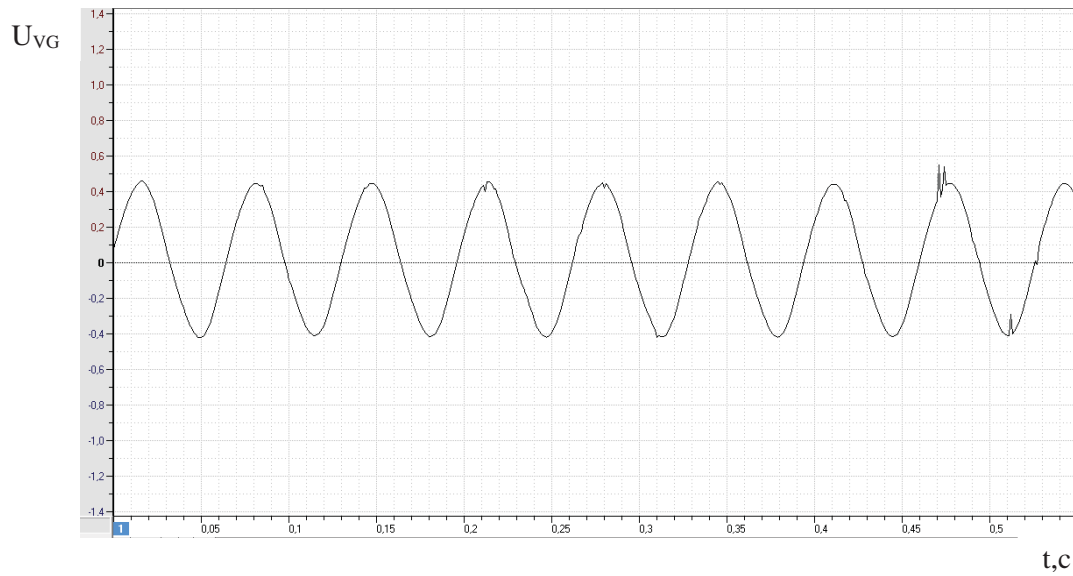
1 – двигатель постоянного тока, 2 – асинхронный двигатель с фазным ротором, 3 – полупроводниковый преобразователь частоты, 4 – потребители электрической энергии

а)

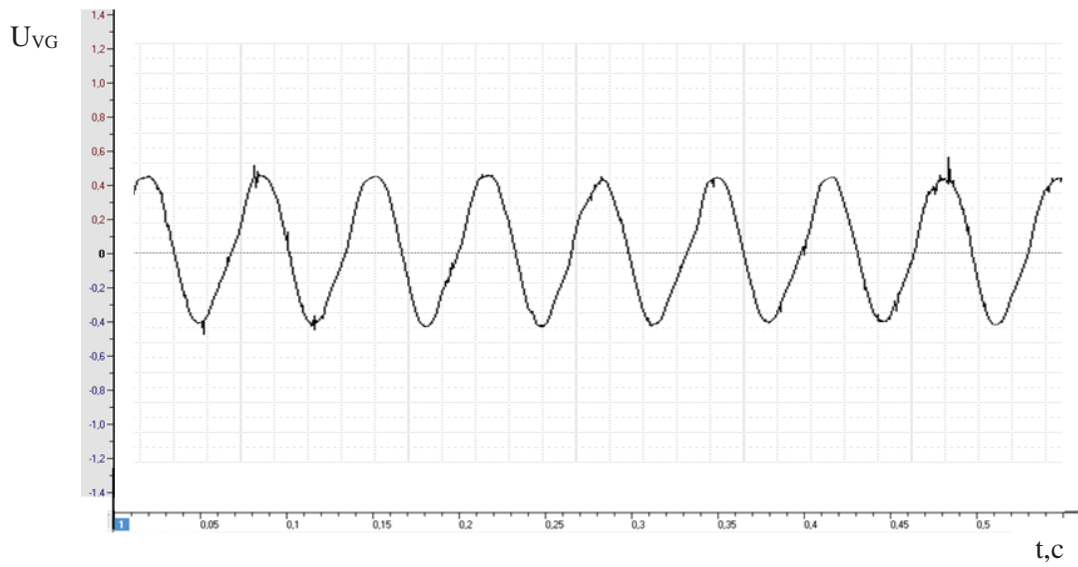
$U_{VG}$



б)



в)



г)

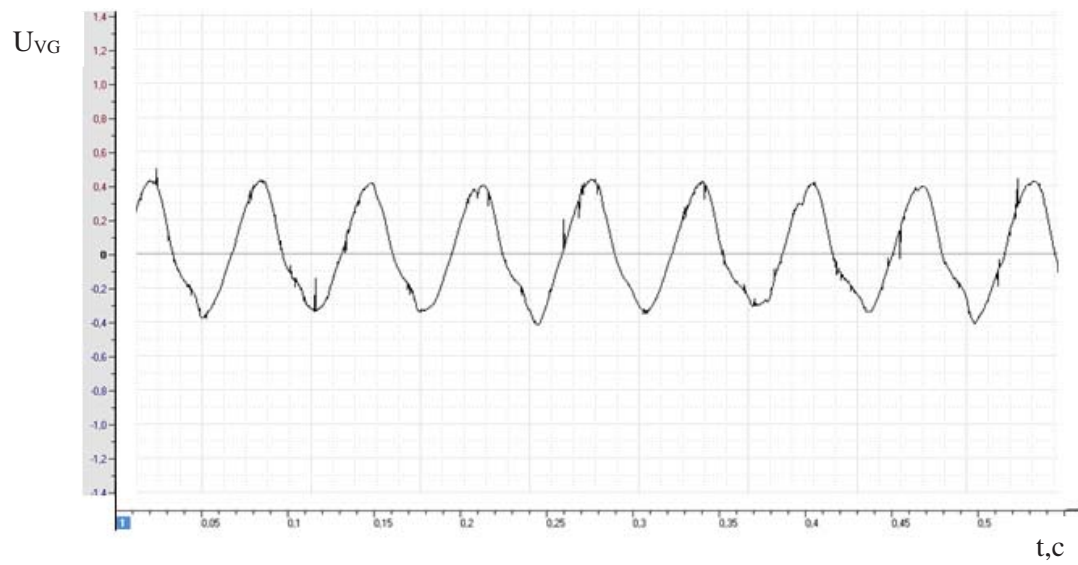


Рис. 2. Мгновенное значение напряжения на зажимах АСМ (асинхронного двигателя с фазным ротором) [6]

а)  $n_p = n_n$ , б)  $n_p = 0.95 \cdot n_n$ , в)  $n_p = 0.9 \cdot n_n$ , г)  $n_p = 0.85 \cdot n_n$ .



Сравнивание мгновенных значений напряжения асинхронизированного синхронного генератора при скоростях ротора  $n_p = 0.95 \cdot n_n, n_p = 0.9 \cdot n_n, n_p = 0.85 \cdot n_n$  с мгновенным значением напряжения того же генератора, полученного при работе генератора в синхронном режиме (когда обмотка возбуждения питается постоянным током, рис. 2а) показывает, что при изменении скорости вращения ротора АСМ до 15 % форма кривой выходного напряжения изменяется незначительно.

**Выводы.** Применяемые на судах с ВРШ синхронные валогенераторы работают с постоянной скоростью вращения, так как в этом случае валогенераторные установки выполняются проще по конструкции. Однако известно, что эффективность энергетической установки может быть увеличена, если при уменьшении нагрузки главного двигателя (ГД) одновременно изменять угол поворота лопастей ВРШ и скорость вращения главного двигателя. Указано, что так, как в этом случае предел регулирования скорости вращения главного двигателя небольшой, то целесообразно в таких установках вместо синхронного генератора применять асинхронизированный синхронный генератор.

В результате экспериментального исследования получены мгновенные значение выходного напряжения на зажимах асинхронизированного синхронного генератора при регулировании и его скорости вращения на 15 % от номинального значения.

ВГУ с асинхронизированным валогенератором с 15 % регулированием частоты тока ротора кроме известных достоинств, выходное напряжение генератора может иметь малоискаженную синусоидальную форму ( $K_{и.с.} = 5,9\%$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Радченко П.М. Судовые валогенераторные и валомашинные установки: Учеб. пособие. – Владивосток: ДВГМА, 1999. – 154 с.
2. Лемин П.А., Пруссаков А.В., Григорьев А.В. Эксплуатация судовых систем электроснабжения: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: ГМА им. адм. С.О.Макарова, 2009. – 180 с.
3. Mehdiyev H.A. Gəmilərin avtomatlaşdırılmış elektroenergetika sistemləri, Ali məktəb tələbələri üçün dərslik. – Bakı: Nurlan, 2006. – 340 səh.
4. Григорьев А.В., Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: Монография. – Санкт-Петербург: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. – 173 с.
5. Bəşirov R.C., İsmayılov S.S. Avar vintinin addımı tənzim olunan gəmilərin val generatoru qurğularının iş rejimlərinin araşdırılması. ADDA, Elmi əsərləri. – № 1. – Bakı. – 2015. – səh. 78–83.
6. Mehdiyev H.A., İsmayılov S.S. Asinxronlaşdırılmış sinxron generatorlarının əsas xüsusiyyətləri və gəmilərdə tətbiqi. AMEA Fizika institutu, Energetikanın problemləri. – № 1. – Bakı. – 2015. – səh. 78–82.

**Мехтієв Г.А., Ісмаїлов С.С.**

#### **ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОНІЗОВАНИХ СИНХРОННИХ ВАЛОГЕНЕРАТОРІВ НА СУДНАХ ІЗ ГРК**

*У статті розглядається використання валогенераторних установок (ВГУ) на сучасних суднах. Застосовані різні види ВРУ та їх економічний ефект. Основна увага приділяється валогенераторним установкам, які використовуються на суднах з гвинтом регульованого кроку (ГРК). Подані найважливіші параметри асинхронізованого синхронного генератора, вказані його переваги та недоліки. Наведена спрощена схема лабораторного стенда ВГУ з асинхронізованим синхронним генератором, де в якості асинхронізованого синхронного генератора використаний асинхронний двигун з фазним ротором, а в якості головного двигуна використаний регульований двигун постійного струму.*

**Ключові слова:** валогенератор, судно, асинхронізований синхронний генератор, головний двигун, перетворювач частоти, гвинт регульованого кроку.

---

---

Mehdiyev H., Ismayilov S.

## APPLICATION FEATURES OF ASYNCHRONOUS SYNCHRONIZING SHAFT GENERATOR ON THE SHIP WITH CPP

*It results with variety of shaft generators plant and their impact economically. The focus of shaft generator installations attracted attention by using of ships with propeller of regulating pitch. It is given main parameters of asynchronous synchronizing generator which shows its advantage and shortage especially dealing to simplification of diagram by laboratory stand of shaft generator with asynchronous synchronizing generator, the quality of generator of asynchronous are applied by slip-ring motors. Regulating engine of direct current is applied as a quality point of view of main engine.*

**Keywords:** shaft generators, ship, asynchronous, synchronized, generator, the main engine, the frequency converter, propeller of regulating pitch.

УДК. 656.6.052

Ганиев А.Я.

## УЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДИСТАНЦИИ И ВРЕМЕНИ КРАТЧАЙШЕГО СБЛИЖЕНИЯ ПРИ РАСХОЖДЕНИИ СУДОВ

*В данной статье рассмотрены основные параметры безопасности при расхождении судов на ограниченной акватории и в ограниченной видимости, составлена программа для расчета расхождения судов с учетом погрешностей дистанции и времени кратчайшего сближения.*

**Ключевые слова:** дистанция кратчайшего сближения, время кратчайшего сближения, фактор, судоводитель, авария, ограниченная акватория, ограниченная видимость, расхождение.

**Анализ современного состояния проблемы.** Основная причина столкновений судов в море – это неготовность судоводителей принимать решения при расхождении судов. Вдобавок к этому каждый судоводитель в одних и тех же ситуациях принимает различные решения. Эта задача намного усложняется при плавании судов на ограниченной акватории или в ограниченной видимости. При этом единственным прибором для получения информации о встречных судах является радиолокационная станция (РЛС) [1]. Также необходимо правильно обрабатывать полученную информацию от РЛС. Для этой цели используется маневренный планшет или САРП (Система автоматической радиопрокладки). САРП автоматически вычисляет и обрабатывает информацию, которую судоводитель вручную выполняет на маневренном планшете. Хорошие навыки по использованию РЛС или САРП являются основным условием для принятия правильного решения при расхождении. Для этого судоводитель в условиях хорошей видимости должен рассчитывать дистанцию и время кратчайшего сближения с учетом влияющих погрешностей и сравнивать их с фактическими.

**Постановка проблемы.** Все расчеты, которые вычисляются вручную или автоматически с помощью САРП, основаны на определении дистанции и времени кратчайшего сближения ( $D_{кр}$  и  $T_{кр}$ ). Допустимые или заданные значения этих параметров назначает судоводитель.