

УДК 629.5.061.17

Рак А.Н., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет»,

Гутаревич В.О., доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОРСКИХ СУДОВ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности определения параметров и выбора аккумуляторных батарейных систем для питания потребителей переменного тока на современных морских для соответствия их требованиям Международной Конвенции. Предложена методика выбора инвертора для работы в составе судовой энергетической системы.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, инвертор, фильтр

Появление нового вида движения на морском транспорте – электрического, ознаменовало собой новый этап в развитии науки [1]. Топливный кризис 1973 г. заставил судовладельцев во всем мире искать новые виды углеводородного топлива и пути сокращения его удельных расходов, а международная Конвенция МАРПОЛ 73/78 и еще более поздние директивы Международной морской организации (ИМО) вовсе поставили вопрос о сокращения выбросов с морских судов, использующих углеводородные виды топлива, до соответствующих уровней [2] и установила зоны экологического контроля [3].

Современные достижения в области полупроводниковой техники позволили по-новому подойти к решению проблемы того времени.

Например, один из ведущих мировых производственных концернов MAN B&W (ФРГ - Дания), специализирующийся, в основном, на производстве различных судовых дизелей, также представил свою разработку - аккумуляторные батарейные системы MAN Hybrid EcoAux, которые в иностранной литературе именуют «Solid State Generator» (SSG). Их внешний вид и структурная схема представлены на рис.1, а технические характеристики в табл.1, но более детальная информация пока еще носит закрытый характер.

Цель работы – разработать методику расчета параметров аккумуляторных батарейных систем для судовых энергетических систем.

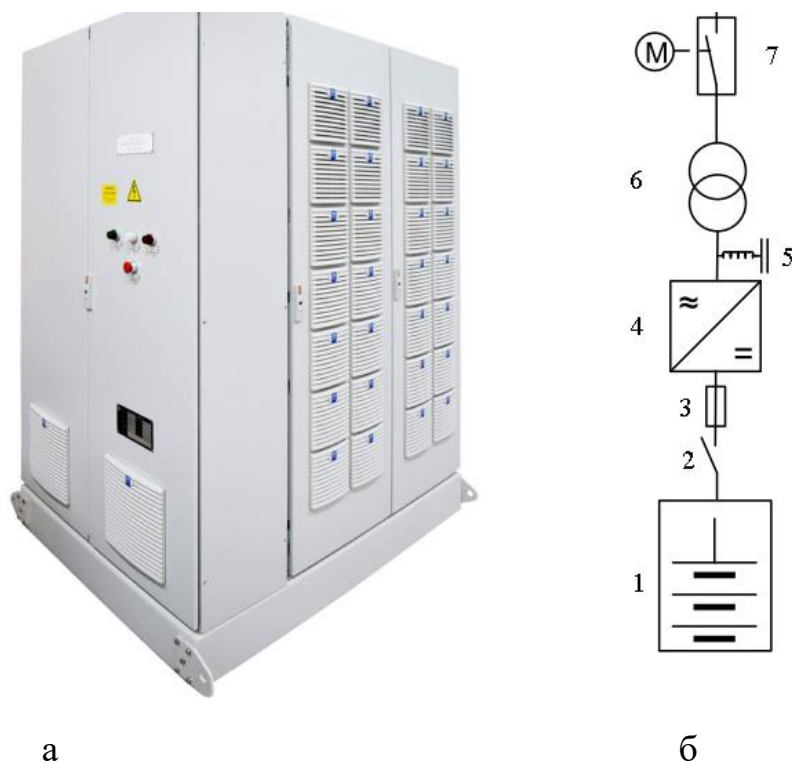


Рис. 1 - Аккумуляторная батарейная система Hybrid EcoAux [4]: внешний вид (а); состав системы (б): 1 - аккумуляторная батарея; 2 – выключатель; 3 – система защиты; 4 – инвертор; 5 – фильтр; 6 – трансформатор; 7 – выключатель с моторным приводом

Таблица 1 – Технические характеристики аккумуляторных батарейных систем Hybrid EcoAux

Мощность, кВт	Напряжение сети, В	Частота, Гц
625	400 - 690	60, 50
405	400 - 690	60, 50
270	400 - 690	60, 50
135	400 - 690	60, 50

Получить необходимый уровень напряжения и значение тока от АБ можно, если соединить их в соответствии с первым и вторым законами Кирхгофа, и не представляет особых затруднений.

Из рис.1, б следует, что в состав таких систем кроме АБ также входит также и инвертор напряжения. Поэтому особый интерес представляет собой расчет параметров и выбор самого инвертора.

Упрощенная схема трехфазного мостового инвертора представлена на рис.2 и содержит в себе три плеча с ключами двусторонней проводимости: плечо А: К1, К2; плечо В: К3, К4; плечо С: К5, К6.

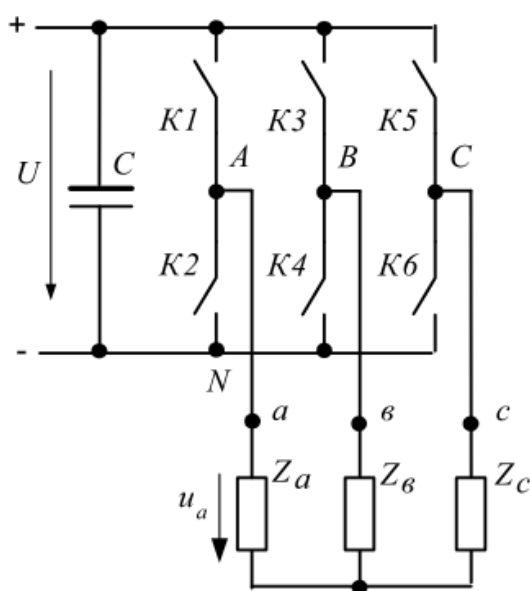


Рис. 2 - Упрощенная схема трехфазного автономного инвертора

В качестве ключей схемы (рис.2) обычно применяют полностью управляемые устройства (транзисторы (рис.3) или тиристоры, которые включаются по цепи управления). При коммутации не полностью управляемых ключей схема дополняется цепями принудительной коммутации.

Для обеспечения двусторонней коммутации ключ имеет обратный диод, который проводит ток на интервалах, когда направление тока и напряжения в фазе автономного инвертора напряжения (АИН) противоположны.

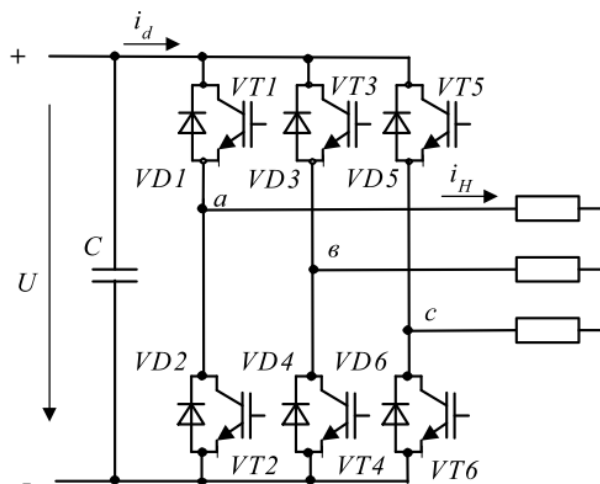


Рис. 3 - Автономный инвертор напряжения с транзисторными ключами

Представим расчет трехфазного АИН с амплитудным регулированием, который применяется для питания двигателя переменного тока со следующими номинальными данными $P_{НОМ} = 100$ кВт, $U_{НОМ} = 380$ В, $f = 50$ Гц, $\eta_{НОМ} = 0,9$, $\cos \varphi_{НОМ} = 0,8$. Схема соединения обмотки статора «звезда». Диапазон регулирования частоты выходного напряжения $(50 \div 5)$ Гц при регулировании выходного напряжения пропорционально частоте.

Исходя из того, что $U_{Л(1)} = U_{НОМ} = 0,78U$ определим диапазон регулирования выходного напряжения источника постоянного тока:

$$\text{- максимальное значение } U_{\max} = \frac{U_{НОМ}}{0,78}; \quad (1)$$

$$\text{- минимальное значение } U_{\min} = 0,1U_{\max}. \quad (2)$$

Действующее значение выходного линейного напряжения в данном случае составит: $U_{Л} = 0,816U$.

Расчет действующего значения тока двигателя выполним для первой гармоники:

$$I_{НОМ} = I_{\Phi(1)} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \cdot \eta_{НОМ}}. \quad (3)$$

Амплитудное значение фазного тока:

$$I_{\Phi m(1)} = \sqrt{2} \cdot I_{\Phi(1)}. \quad (4)$$

Частота переключения ключей схемы не превышает 50 Гц, поэтому в схеме, наряду с IGBT, можно применять тиристоры, включающиеся по сигналу в цепи управления. Средний ток тиристора и диода

$$I_{VSCP} = \frac{I_{\Phi m(1)}}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos \varphi)}{2}, \quad (5)$$

$$I_{VDCP} = \frac{I_{\Phi m(1)}}{\pi} \cdot \frac{(1 - \cos \varphi)}{2}. \quad (6)$$

Тиристоры и диоды выбираем по средним значениям тока, по напряжениям с учетом возможных коммутационных перенапряжений выбираем по значению $2U_{\max}$,

В. Транзистор выбираем по максимальному току $I_{VT \max} = \sqrt{2} \cdot I_{НОМ}$, А

Таким образом, выбираем транзисторный модуль с встроенным диодом CM300DY-24A с рабочим напряжением 1200В и током 300А.

Среднее значение тока в цепи постоянного тока на входе инвертора:

$$I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{Л(1)} \cdot I_{\Phi(1)} \cdot \cos \varphi}{U}, \text{ А} \quad (7)$$

Считаем, что АИН получает питание от сети переменного тока через трехфазный мостовой выпрямитель с входным емкостным фильтром. Относительное значение выпрямленного напряжения принимаем $u_d=0,94$, коэффициент пульсаций $K_{\Pi}=0,05$, тогда в соответствии с таблицей основных соотношений для соответствующих схем:

$$I_d^* = 0,026, \quad I_{dm(6)}^I = \frac{I_{dm(6)}}{I_d} = 0,711.$$

$$I_{dm(6)} = I_d \cdot I_{dm(6)}^I, \text{ А}. \quad (8)$$

Амплитуда 6-й гармоники входного тока АИН при частоте выходного напряжения 50Гц:

$$I_{m(6)} = 2I_d \cdot \frac{1}{k^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi}, \text{ А} \quad (9)$$

Емкость составит:

$$C = \left(\frac{I_{dm(6)}}{\omega} + \frac{I_{m(6)}}{\omega} \right) \cdot \frac{1}{6 \cdot K_{\Pi} \cdot U}, \text{ мкФ}. \quad (10)$$

Определяем емкость конденсатора на входе АИН при минимальной входной частоте 5Гц и номинальной нагрузке двигателя $I_{\Phi(1)} = 211\text{А}$.

$$I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{Л(1)} \cdot I_{\Phi(1)} \cdot \cos \varphi}{U}, \text{А} \quad (11)$$

Неизменным будет и значение $I_{m(6)}=60,06\text{А}$. Емкость конденсатора без учета $I_{m(6)}$ составит:

$$C = \frac{I_{m(6)}}{6 \cdot K_{\Pi} \cdot U}, \text{мкФ} \quad (12)$$

Таким образом, при уменьшении выходной частоты в 10 раз, величина емкости, необходимой для обеспечения того же уровня пульсаций напряжения на входе в АИН, возросла в 27 раз. Именно это значение емкости следует и выбирать.

Следует отметить, что применение схемы (рис.3) позволяет получить на выходе напряжением синусоидальной формы [5].

Кроме определения параметров инвертора не меньший интерес представляют и особенности выбора его самого.

Мощность самого инвертора выбирают по суммарной приведенной мощности потребителей и проверяют по допустимой перегрузке в режиме пуска самого мощного двигателя.

Приведенная расчетная мощность приемников электрической энергии $P_{\text{расч}}$ определяется с учетом неодновременности включения отдельных потребителей, что учитывается коэффициентом спроса K_c .

$$P_{\text{РАСЧ}} = \sum_{i=1}^n K_{ci} \cdot P_i, \quad (13)$$

где P_i – номинальная мощность потребителя электрической энергии. При этом, при установке нескольких одинаковых приемников необходимо брать сумму этих мощностей; K_{ci} – коэффициент спроса i -го приемника.

Также необходимо иметь в виду, что существуют приемники, которые потребляют мощность, значительно превышающую номинальную, т.е. пусковую, которая определяется:

$$P_{\text{ПУСК}}^{\text{МАКС}} = P_H \cdot K_{\Pi}, \quad (14)$$

где P_H – номинальная мощность наиболее мощного электродвигателя; K_P – кратность пускового тока.

Далее из $P_{расч}$ вычитаем пусковую мощность наиболее мощного потребителя можно определить из выражения:

$$P_{РАСЧ}^{k-1} = P_{РАСЧ} - P_H \cdot K_C, \quad (15)$$

где $P_{РАСЧ}^{k-1}$ – расчетная мощность всех потребителей без учета мощности наиболее мощного.

Тогда расчетную пиковую мощность инвертора можно определить:

$$P_{РАСЧ}^{МАКС} = P_{РАСЧ}^{k-1} + P_{ПУСК}^{МАКС}. \quad (16)$$

Далее по справочнику выбираем инвертор, но, при этом должны обязательно выполняться условия:

$$P_{ИНВ}^{НОМ} \geq P_{РАСЧ}, \quad (17)$$

$$P_{ИНВ}^{ПИК} \geq P_{РАСЧ}^{МАКС}, \quad (18)$$

где $P_{ИНВ}^{НОМ}$, $P_{ИНВ}^{ПИК}$ – номинальная и пиковая мощность инвертора.

Если пиковая мощность инвертора неизвестна, то ее можно определить:

$$P_{ИНВ}^{ПИК} = K_3 \cdot P_{ИНВ}^{НОМ} \quad (19)$$

где $K_3=1,5$ – коэффициент запаса.

Еще одной важной характеристикой при выборе инвертора является величина его входного напряжения.

Для уменьшения входных токов и потерь рекомендуется согласовывать входное напряжение и мощность инвертора: 12 В при мощности 600 Вт; 24 В при мощности от 600 до 1500 Вт; 48 В при мощности более 1500 Вт.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика, которая позволяет определять параметры автономных инверторов напряжения, входящих в состав аккумуляторных батарейных систем и обеспечивающих на выходе синусоидальную форму напряжения.

2. Предложенная методика дает возможность обоснованно произвести выбор инвертора для работы в составе судовой энергетической системы. Переход к таким

системам позволит существенно сократить количество выбросов с морских судов в зонах экологического контроля

Список использованных источников

1. Рак, А. Н. Современные тенденции применения аккумуляторных батарей в электродвижении морских судов / А. Н. Рак, В. О. Гутаревич, И. П. Арзютов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Седьмой национальной (всероссийской) научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 14–15 ноября 2024 года. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2025. – С. 73-78.
2. МАРПОЛ 73/78. Приложение VI (пересмотренное) к Конвенции "Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов" / ЗАО ЦНИИМФ Санкт-Петербург, 2022 – 50 с.
3. Руководство по применению положений Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78. НД №2-030 101-049 / ФАУ «Российский морской регистр судоходства» Санкт-Петербург, 2022 – 135 с.
4. MAN Hybrid EcoAux. www.man-es.com.
5. Силовые полупроводниковые преобразователи энергии / А. А. Шавелкин; Харьков. нац. ун-т. городского хозяйства им. А. Н. Бекетова. – Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015. – 403 с.

Rak A.N., candidate of technical Sciences, associated professor, Kamchatka State Technical University,

Gutarevich V.O., doctor of technical Sciences, associated professor, Donetsk National Technical University.

JUSTIFICATION PARAMETERS OF RECHARGEABLE BATTERIES SYSTEMS FOR MARINE VESSEL

Abstract. The paper considers the features of determining the parameters and choosing rechargeable battery systems for powering AC consumers in modern marine facilities to meet their requirements of the International Convention. A method for selecting an inverter for operation as part of a ship's power system is proposed.

Keywords: rechargeable battery, inverter, filter