АНАЛИЗ ДЕМАСКИРУЮЩИХ ПРИЗНАКОВ ШТАТНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Иванишко А. Н.[1], Баширов С. Ю.[2], Крупенин А. А.[3]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-53-58

Ключевые слова: *тепловое излучение, акустическая сигнатура, эффективная площадь рассеяния, электромагнитное излучение, интегральный показатель заметности, маскировка.*

Аннотация

Цель работы: *анализ демаскирующих признаков штатных автономных систем электроснабжения (АСЭС) и обоснование комплексного показателя их заметности с учётом опыта специальной военной операции.*

Метод исследования: *методологическую основу составили теория теплопроводности, классическая акустика, электродинамика, теория радиолокационного рассеяния, а также метод экспертных оценок для определения весовых коэффициентов значимости демаскирующих признаков. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок задач и согласованностью теоретических оценок с данными технической документации и результатами измерений.*

Результаты исследования: *систематизированы пять видов демаскирующих признаков АСЭС – тепловые, акустические, радиолокационные, электромагнитные и визуальные. Получены аналитические зависимости для оценки вероятности обнаружения ДГУ по тепловому каналу, дальности акустического обнаружения, эффективной площади рассеяния элементов АСЭС и напряжённости электромагнитного поля преобразовательных устройств. Предложен интегральный показатель заметности K_зам, учитывающий взвешенную совокупность всех признаков. Обоснованы весовые коэффициенты значимости каждого признака методом экспертных оценок на основе опыта СВО.*

Научная новизна: *заключается в разработке интегрального показателя заметности АСЭС, позволяющего проводить сравнительную оценку различных конфигураций систем электроснабжения по единому критерию, выявлять наиболее критичные демаскирующие признаки и обосновывать направления снижения заметности с учётом опыта современных боевых действий.*

Введение

Автономные системы электроснабжения (АСЭС) являются неотъемлемой составной частью подвижных объектов связи и военной техники, обеспечивая функционирование аппаратуры связи, технических средств обеспечения обитаемости и систем управления [1]. Эффективность АСЭС традиционно оценивается технико-экономическими показателями – часовым расходом топлива, массогабаритными характеристиками, временем непрерывной работы [1]. Однако в условиях современных боевых действий не менее важным становится показатель скрытности функционирования: работающие источники электроснабжения создают физические поля, демаскирующие объекты и делающие их уязвимыми для средств технической разведки противника.

Опыт специальной военной операции (СВО) показал, что тепловизионные датчики, акустические и радиолокационные средства разведки стали массовыми на поле боя. Это вынуждает пересматривать традиционные подходы к маскировке систем электроснабжения и учитывать демаскирующие признаки наравне с технико-экономическими показателями. При этом единый количественный критерий, позволяющий сопоставить различные конфигурации АСЭС по степени их заметности, в известных работах не сформулирован, что затрудняет обоснованный выбор направлений снижения заметности.

Основная часть

Под демаскирующими признаками понимаются физические поля и излучения, создаваемые объектом, которые могут быть обнаружены средствами технической разведки противника. Для АСЭС характерны пять основных видов демаскирующих признаков: тепловые, акустические, радиолокационные, электромагнитные и визуальные. Каждый из признаков обладает различной дальностью обнаружения и степенью критичности, что обусловливает необходимость их совместного анализа.

Тепловое излучение является наиболее значимым демаскирующим признаком работающей

1 ***Иванишко Александр Николаевич***, начальник направления Главного управления связи Вооруженных Сил Российской Федерации, г. Москва, Россия. E-mail: GUS_1@mil.ru

2 ***Баширов Сергей Юрьевич***, заместитель начальника управления Главного управления связи Вооруженных Сил Российской Федерации. Москва, Россия. E-mail: S.bashirov81@yandex.ru

3 ***Крупенин Александр Александрович***, главный эксперт направления Главного управления связи Вооруженных Сил Российской Федерации. Москва, Россия. E-mail: GUS_2@mil.ru

ДГУ. Пороговая чувствительность современных тепловизоров составляет 0,05–0,1 °C. Согласно теории уязвимости, вероятность обнаружения работающей ДГУ описывается выражением [1]:

$$P_{\text{обн}}^{\text{ТВ}} = 1 - \exp\left(-\frac{S_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{набл}}}{\pi \cdot R^2} \cdot \frac{\Delta T_{\text{конт}}}{\Delta T_{\text{порог}}}\right). \quad (1)$$

Распределение температуры по поверхности ДГУ описывается уравнением теплопроводности [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho \cdot c}. \quad (2)$$

Дальность обнаружения определяется упрощенной зависимостью [1]:

$$R_{\text{обн}} = \sqrt{\frac{\tau \cdot \Delta T \cdot S_{\text{пр}}}{\Delta T_{\text{порог}} \cdot \pi}}. \quad (3)$$

Согласно технической документации на ДГУ типа ЭД-30, ЭД-60 [1], температурные режимы элементов: выхлопной коллектор нагревается до 350–450 °C (форсированный режим – до 500–600 °C), тепловой контраст 330–580 °C; поверхность двигателя – 80–120 °C, тепловой контраст 60–130 °C; выпускной патрубок – 250–350 °C, тепловой контраст 230–480 °C. Для типовых ДГУ температурный контраст достигает 450–550 °C, что обеспечивает обнаружение с дальности 5–15 км.

Аккумуляторные батареи в режиме заряда выделяют тепло, их температура повышается на 5–15 °C, обнаружение возможно только на ближних дистанциях (до 1–2 км).

Работающие дизель-генераторные установки создают интенсивный *акустический шум*, который может быть обнаружен средствами акустической и сейсмической разведки. Источниками акустического шума ДГУ являются механический шум (вибрация двигателя, работа кривошипно-шатунного механизма), аэродинамический шум (процессы впуска и выпуска газов, работа вентилятора) и электромагнитный шум (вибрация обмоток генератора, искрение щеточного узла).

Уровень звукового давления на расстоянии R от источника определяется по классической формуле распространения звука в свободном пространстве [2]:

$$L(R) = L_0 - 20\lg\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha \cdot R. \quad (4)$$

В таблице 1 представлены данные по уровням шума ДГУ различных типов, полученные из технической документации и результатов измерений [1].

Спектральная плотность мощности шума может быть представлена в виде суммы дискретных гармонических составляющих и широкополосного шума [2]:

$$S(f) = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot \exp\left(-\frac{(f - f_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) + S_{\text{ш}}(f). \quad (5)$$

Применение шумозащитного кожуха позволяет снизить уровень шума на 20–30 дБА, контейнерное исполнение – на 55–65 дБА [1].

Опыт СВО показал, что инверторные электроагрегаты гражданского (двойного) назначения обладают существенно меньшей акустической заметностью – уровень шума составляет 56–76 дБА в зависимости от мощности (1–4,5 кВт), что на 20–40 дБА ниже, чем у штатных ДГУ открытого исполнения. При этом портативные электростанции на литий-железо-фосфатных АКБ в режиме разряда не создают акустического поля, что делает их практически необнаружимыми акустическими средствами разведки

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) является ключевым параметром, определяющим *радиолокационную заметность* объекта [3]. Для сложных объектов, таких как ДГУ, ЭПР формируется за счет нескольких механизмов рассеяния: зеркального отражения от плоских металлических поверхностей, дифракционного рассеяния на острых кромках, эффекта уголкового отражателя (взаимно перпендикулярные плоскости корпуса и выхлопной трубы).

Общая ЭПР сложного объекта с учетом интерференции сигналов, отраженных от отдельных элементов конструкции, определяется по формуле [4]:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i + 2\sum_{i<j} \sqrt{\sigma_i \cdot \sigma_j}\cos(\varphi_{ij}). \quad (6)$$

Таблица 1.

Акустическая сигнатура ДГУ

Тип ДГУ	Мощность, кВт	Уровень шума на 1 м, дБА	Спектральная характеристика
ДГУ-30 (открытая)	30	95–105	Низкочастотная (50–500 Гц)
ДГУ-60 (открытая)	60	100–110	Низкочастотная (50–500 Гц)
ДГУ-30 (контейнерная)	30	70–80	Сглаженная
ДГУ-60 (контейнерная)	60	75–85	Сглаженная

Таблица 2.

Эффективная площадь рассеивания элементов АСЭС

Элемент АСЭС	ЭПР, м²	Примечание
ДГУ открытого исполнения	5–15	Металлический корпус, выхлопная труба
ДГУ контейнерного типа	3–8	Металлический контейнер
Кабельные линии(на 1 м)	0,1–0,5	Зависит от диаметра и высоты
Распределительный щит	2–5	Металлический корпус

Для оценки ЭПР отдельных элементов используются расчетные зависимости: для плоской металлической пластины $\sigma = 4\pi A^2 / \lambda^2$, для уголкового отражателя $\sigma = 4\pi a^4 / (3\lambda^2)$.

В таблице 2 приведены экспериментальные данные по ЭПР элементов АСЭС [2, 9].

Для сравнения: ЭПР человека составляет около 0,8 м², легкового автомобиля – 1–3 м², истребителя – 3–5 м² [3, 4]. Таким образом, ДГУ открытого исполнения обладает радиолокационной заметностью, сопоставимой с легкой авиационной целью. ЭПР зависит от длины волны зондирующего сигнала; в различных диапазонах РЛС (L, S, C, X, Ku) значения ЭПР могут отличаться на 5–10 дБ.

Преобразовательные устройства (инверторы, выпрямители, источники бесперебойного питания) *создают электромагнитные излучения*, которые могут быть обнаружены средствами радиоэлектронной разведки (РЭР). Источниками электромагнитного излучения в АСЭС являются: силовые полупроводниковые ключи (IGBT-транзисторы, MOSFET), диодные выпрямители, генератор ДГУ (искрение щеточного узла), кабельные линии (антенный эффект).

Электромагнитное излучение распространяется по двум каналам: кондуктивные помехи (по проводным линиям) и излучаемые помехи (через пространство). Напряженность электромагнитного поля, создаваемого источником на расстоянии RR в дальней зоне, определяется по формуле[4]:

$$E(f) = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{изл}(f) \cdot G(f)}}{R}. \qquad (7)$$

4 ГОСТ 30804.6.3-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам. – М.: Стандартинформ, 2013.

В ближней зоне (на расстояниях менее $\lambda / 2\pi$) структура поля более сложна и описывается уравнениями Максвелла.

Основными источниками излучения являются инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Мощность излучаемых помех может быть оценена по формуле $P_{изл} \approx (1/2\pi) \cdot C \cdot U^2 \cdot f_{ком}$, где C – емкость монтажа, U – напряжение коммутации, $f_{ком}$ – частота коммутации.

Экранирование преобразовательных устройств позволяет снизить уровень излучаемых помех на 20–40 дБ[4]. Эффективность экранирования определяется выражением $SE = 20\lg(1 + Z_э / Z_в)$, где $Z_э$ – волновое сопротивление экрана, $Z_в$ – волновое сопротивление окружающей среды.

Для комплексной оценки заметности АСЭС, учитывающей совокупность всех демаскирующих признаков, предлагается интегральный показатель. Необходимость введения такого показателя обусловлена тем, что каждый из рассмотренных признаков (тепловой, акустический, радиолокационный, электромагнитный) вносит различный вклад в общую заметность объекта, и этот вклад зависит как от физических характеристик самого признака, так и от возможностей средств технической разведки противника.

Интегральный показатель заметности $K_{зам}$ представляет собой взвешенную сумму нормированных вероятностей обнаружения по каждому из признаков:

$$K_{зам} = \alpha_{ТВ} \cdot \frac{P^{ТВ}_{обн}}{P^{ТВ}_{обн\ max}} + \alpha_{АК} \cdot \frac{P^{АК}_{обн}}{P^{АК}_{обн\ max}} + \\ + \alpha_{РЛ} \cdot \frac{P^{РЛ}_{обн}}{P^{РЛ}_{обн\ max}} + \alpha_{ЭМ} \cdot \frac{P^{ЭМ}_{обн}}{P^{ЭМ}_{обн\ max}}, \qquad (8)$$

Таблица 3.

Электромагнитная сигнатура элементов АСЭС

Тип оборудования	Частотный диапазон	Уровень излучения	Характерные особенности
Инвертор (ШИМ)	1–100 кГц	Средний	Широкополосный спектр
Выпрямитель	50–1000 Гц	Низкий	Гармоники сетевой частоты
ДГУ (генератор)	50–500 кГц	Средний	Импульсный характер
Кабельные линии	50 Гц и гармоники	Низкий	Излучение по всей длине

где α_i – весовые коэффициенты, характеризующие значимость каждого вида демаскирующих признаков ($\sum\alpha_i = 1$); $P_{\text{обн}i}$ – вероятность обнаружения по ii-му признаку, рассчитываемая по формулам (1), (4) и др.; $P_{\text{обн }maxi}$ – максимально возможная вероятность обнаружения по i-му признаку (принимается равной 1 для всех признаков).

Отдельная оценка каждого демаскирующего признака не позволяет сделать вывод об общей заметности АСЭС, так как различные признаки могут иметь разную степень критичности. Например, тепловой признак может быть высоким, а акустический – низким. Интегральный показатель позволяет:

- сравнивать различные конфигурации АСЭС по единому критерию;
- выявлять наиболее критичные признаки для конкретной конфигурации;
- обосновывать выбор направлений снижения заметности.

Весовые коэффициенты α_i определены методом экспертных оценок на основе анализа опыта СВО. В качестве экспертов привлекались специалисты в области военной техники и маскировки. Экспертная оценка проводилась по следующим критериям:

- частота использования данного признака средствами разведки противника;
- дальность обнаружения по данному признаку;
- сложность маскировки данного признака;
- значимость признака для наведения высокоточного оружия.

Результаты экспертной оценки приведены в таблице 4.

Сравнительный анализ заметности различных конфигураций АСЭС, выполненный с использованием предложенного интегрального показателя, представлен в таблице 5.

Тепловой признак наиболее критичен: температурный контраст 400–550 °С обеспечивает обнаружение с дальности 5–15 км. Акустическая сигнатура (95–110 дБ) позволяет обнаруживать ДГУ с дальности 3–5 км, контейнерное исполнение снижает уровень шума на 55–65 дБА. Радиолокационная заметность ДГУ (ЭПР 5–15 м^2) сопоставима с легкой авиационной целью.

Заключение

Проведённый анализ показал, что наиболее критичным демаскирующим признаком работающей ДГУ является *тепловое излучение*: температурный контраст 400–550 °С обеспечивает обнаружение с дальности 5–15 км современными тепловизорами с пороговой чувствительностью 0,05–0,1 °С. *Акустическая сигнатура* ДГУ открытого исполнения (95–110 дБА) позволяет обнаруживать их с дальности 3–5 км; контейнерное исполнение снижает уровень шума на 55–65 дБА,

Таблица 4.

Обоснование весовых коэффициентов

Вид демаскирующего признака	α_i	Обоснование
Тепловой	0,45	Основной признак, используемый БпЛА-камикадзе; дальность обнаружения до 15 км; сложность полной маскировки
Акустический	0,25	Значимый для наземной разведки; дальность обнаружения до 5 км; относительно простая маскировка (капонирование, кожухи)
Радиолокационный	0,20	Важен для спутниковой и авиационной разведки; дальность обнаружения до 30 км; снижается применением радиопоглощающих материалов
Электромагнитный	0,10	Наименее значим; требует специальной аппаратуры обнаружения; эффективно снижается экранированием

Таблица 5.

Сравнительный анализ заметности конфигураций АСЭС

Конфигурация АСЭС	Тепловая заметность	Акустическая заметность	Радиолокационная заметность	$K_{\text{зам}}$
ДГУ открытая	Высокая	Высокая	Средняя	0,85
ДГУ контейнерная	Средняя	Средняя	Средняя	0,60
ДГУ капонированная	Средняя	Низкая	Низкая	0,40
Гибридная (режим «скрытное дежурство»)	Низкая	Отсутствует	Низкая	0,15

шумозащитный кожух – на 20–30 дБА. *Радиолокационная заметность* ДГУ открытого исполнения (ЭПР 5–15 м^2) сопоставима с лёгкой авиационной целью, что делает их уязвимыми для авиационной и спутниковой разведки. *Электромагнитное излучение* преобразовательных устройств (ШИМ-инверторов) является наименее значимым признаком, однако требует специальной аппаратуры обнаружения и эффективно снижается экранированием (на 20–40 дБ).

Предложенный *интегральный показатель заметности* $K_{зам}$ позволяет сравнивать различные конфигурации АСЭС по единому критерию: от 0,85 для ДГУ открытого исполнения до 0,15 для гибридных схем с режимом «скрытное дежурство». Инверторные электроагрегаты гражданского назначения и портативные электростанции на $LiFePO_4$ обладают существенно меньшей заметностью, однако при их работе сохраняется тепловой след от двигателя и электромагнитное излучение преобразовательных устройств, что требует применения дополнительных мер маскировки.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную верификацию предложенного интегрального показателя в натурных условиях и на его совместное рассмотрение с технико-экономическими критериями эффективности АСЭС.

Литература

1. Электроснабжение телекоммуникационных систем, стационарных и полевых узлов связи / А. В. Мякотин, Д. Ю. Замазий, Е. А. Кордюков, Н. М. Мельников, Н. Г. Сысоев, Д. Б. Шляхтенко; под ред. А. В. Мякотина. – СПб.: ВАС, 2018. – 408 с.
2. Исакович М. А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 495 с.
3. Справочник по радиолокации: в 2 т. / под ред. М. И. Сколника; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2014.
4. Воробьёв А. Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. – М.: Эко-Трендз, 2002.

ANALYSIS OF DEMASKING FEATURES OF STANDARD AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Ivanishko A. N.[5], Bashirov S. Yu.[6], Krupenin A. A.[7]

Keywords: *thermal radiation, acoustic signature, effective scattering area, electromagnetic radiation, integral visibility indicator, camouflage.*

Abstract

The purpose of the work *is to analyze the demasking features of standard autonomous power supply systems (APSS) and to substantiate a complex indicator of their visibility taking into account the experience of the special military operation.*

Research method: *the methodological basis was the theory of heat conduction, classical acoustics, electrodynamics, the theory of radar scattering, as well as the method of expert assessments for determining the weight coefficients of the significance of demasking features. The reliability of the results is ensured by the correctness of the problem statements and the consistency of theoretical estimates with the data of technical documentation and measurement results.*

Results of the study: *five types of demasking features of APSS – thermal, acoustic, radar, electromagnetic and visual – have been systematized. Analytical dependencies have been obtained for assessing the probability of detecting diesel generator sets by the thermal channel, the range of acoustic detection, the effective scattering area of APSS elements, and the electromagnetic field strength of converter devices. An integral visibility indicator K_{vis}Kvis, taking into account the weighted combination of all features, has been proposed. The weighting coefficients of the significance of each feature have been substantiated by the method of expert assessments based on the experience of the special military operation.*

Scientific novelty: *consists in the development of an integral visibility indicator of APSS, which allows a comparative assessment of various configurations of power supply systems according to a single criterion, identifying the most critical demasking features, and substantiating directions for reducing visibility considering the experience of modern combat operations.*

5 ***Alexander N. Ivanishko***, Head of the Main Communications Directorate of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow, Russia. E-mail: GUS_1@mil.ru

6 ***Sergey Yu. Bashirov***, Deputy Head of the Department of the Main Directorate of Communications of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, Russia. E-mail: S.bashirov81@yandex.ru

7 ***Alexander A. Krupenin***, Chief Expert of the Main Communications Directorate of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, Russia. E-mail: GUS_2@mil.ru

References

1. Elektrosnabzhenie telekommunikacionnyh sistem, stacionarnyh i polevyh uzlov svjazi / A. V. Mjakotin, D. Ju. Zamazij, E. A. Kordjukov, N. M. Mel'nikov, N. G. Sysoev, D. B. Shljahtenko; pod red. A. V. Mjakotina. – SPb.: VAS, 2018. – 408 p.
2. Isakovich M. A. Obshhaja akustika. – M.: Nauka, 1973. – 495 p.
3. Spravochnik po radiolokacii: v 2 t. / pod red. M. I. Skolnika; per. s angl. – M.: Tehnosfera, 2014.
4. Vorob'ev A. Ju. Elektrosnabzhenie komp'juternyh i telekommunikacionnyh sistem. – M.: Eko-Trendz, 2002.