

В.А. Шевченко

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аннотация. Разработан метод измерения и контроля нагрузки электростанции с использованием вероятностных характеристик, позволяющий контролировать нагрузку судовой электростанции и прогнозировать ее дальнейшее изменение. Получены выражения для определения математического ожидания, дисперсии и среднего времени выброса нагрузки электростанции за ее допустимый предел.

Опытным путем получены: интегральный закон распределения нагрузки; гистограммы нагрузки; экспериментальные характеристики нагрузки; нормированная корреляционная функция, вычисленная по множеству реализаций; суточные колебания математических ожиданий относительно средних значений, а также колебания стандартного отклонения нагрузки относительно средних значений.

Ключевые слова: нагрузка электростанции, вероятностные характеристики, прогнозирование, генераторный агрегат.

Постановка проблемы. В последние десятилетия рост энерговооруженности судов торгового и специализированного флота, а также их оборудование большим числом генераторных агрегатов и неоднородных по своим характеристикам потребителей актуализировало проблему управления электроэнергетическими установками сложных структур [1,2]. При этом одним из наиболее важных является вопрос управления электрической станцией в условиях изменения нагрузки в нормальных и аварийных режимах [3], где ключевыми являются задачи согласования уровней рабочей мощности и генерируемой мощности, требуемой в данный момент; перехода от одного уровня генерируемой мощности к другому с учетом критериев эффективности; управление составом генераторных агрегатов (ГА) с учетом состояний электростанции и управляющих воздействий от оператора;

организация включения/отключения ГА с учетом аварийных состояний ГА и управляющих воздействий от оператора.

Анализ публикаций по теме исследования. В работах [4,5] исследованы процессы управления гибридными судовыми пропульсивными комплексами, где одним из критериев является оптимальное управление судовой электроэнергетической установкой (СЭЭУ) с точки зрения определения текущей загрузки генераторных агрегатов и ее дальнейшего прогнозирования.

Исследование [6] посвящено разработке системы принятия решений при построении комбинированных пропульсивных комплексов, одним из ключевых элементов которой является менеджмент потоков электрической мощности.

В работе [7] предложен алгоритм и методика быстрой оценки и измерения основных параметров электроэнергии судовой электроэнергетической системы, построенной на основе синхронного генератора. Основная особенность нового решения базируется на применении усовершенствованной методики мультиплицированной обработки информации, поступающей от измерительных датчиков тока и напряжения судового генератора.

Таким образом, задача поиска методов измерения и контроля нагрузки электростанции не является тривиальной в особенности при стохастических условиях, которые присущи большинству СЭЭУ современных судов

Формулировка целей статьи. Целью работы является поиск методов измерения и контроля нагрузки электростанции с использованием вероятностных характеристик с возможностью дальнейшего их использования в высокоэффективных системах управления СЭЭУ.

Основная часть. Для получения текущей информации о состоянии объекта система должна выполнять следующие основные функции: восприятие входных величин и преобразование их в сигналы, необходимые для последующих операций; формирование и реализация норм в аналоговом и цифровом видах; сравнение величин входных сигналов или функций от них с нормами (уставками); формирование количественного суждения и выдача его в информационную модель или (и) в контур автоматического управления ЭЭС.

Наличие погрешностей устройств измерения и контроля приводит к специфическим ошибкам, которые следует учитывать при оценке качества контроля и решения задач управления.

Будем различать ошибки первого рода, определяющие вероятность ложного показания (срабатывания аларма) и ошибки второго рода, определяющие вероятность пропуска регистрации перехода параметром x порогового значения.

Свяжем параметр x с генерируемой мощностью в ходовом режиме l – параллельно работающими агрегатами, изменение которой должно контролироваться между верхними x_{PH} и нижними x_{PD} порогами загрузки. Если не учитывать редкие пики нагрузки, вызываемые включением мощных эпизодически работающих потребителей (пожарный насос, компрессор пускового воздуха и т.п.), то процесс нагрузки электростанции в режимах хода и стоянки без грузовых операций можно отнести к стандартному, эргодичному с нормальной плотностью распределения вероятностей значения мощности $F(x)$ [8].

Если теперь предположить, что измеряемая нагрузка x и погрешность измерения в вероятном смысле не зависимы, то результат контроля можно получить, оперируя композицией плотностей распределения $F(x)$ и $\theta(\varepsilon)$, рис. 1, а, б.

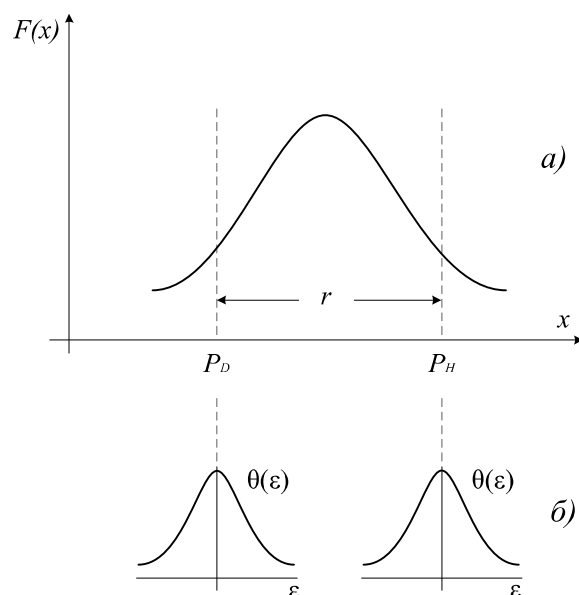


Рисунок 1 - а) – Плотность распределения вероятностей контролируемой величины $F(x)$; б) – плотность распределения вероятностей погрешностей $\theta(\varepsilon)$

Как известно, если плотности распределения $F(x)$ и $\theta(\varepsilon)$ нормальны, то плотность распределения суммы независимых случайных

величин будет также нормальной, математические ожидания и дисперсии случайных величин x и ε при этом складываются.

Если на погрешность измерения наложить ограничения $x_{PH} - x_{PD} > \varepsilon_{max}$ и воспользоваться выводами [8], то можно найти вероятность ошибки первого MIS(1) и второго MIS(2) рода:

$$\text{MIS}(1) = \int_{PD(l)}^{PH(l)} F(x) \left(\int_{-\infty}^{x_{PD}-x} \theta(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{x_{PH}-x}^{\infty} \theta(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx;$$

$$\text{MIS}(2) = \int_{-\infty}^{PD} F(x) \left(\int_{x_{PD}-x}^{x_{PH}-x} \theta(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx + \int_{PH}^{\infty} f(x) \left(\int_{x_{PD}-x}^{x_{PH}-x} \theta(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx;$$

Для практических целей представляет интерес использование приближенных оценок этих вероятностей, например, с использованием номограмм [8], связывающих среднеквадратическое отклонение погрешности устройств измерения $\sigma\varepsilon$ и контролируемой величины σx , а также зону допуска r . При заданных значениях $r/\sigma x$ по номограмме можно найти либо $3\sigma\varepsilon/r$ либо $3\sigma\varepsilon/\sigma x$. Уменьшения ошибок можно добиться путем многократного повторения операций контроля или путем двукратного контроля, используя разные средства контроля.

При организации процессов измерения и контроля возникает задача дискретизации той или иной контролируемой величины, т.е. задача определения допустимого значения интервала контроля. Связано это с тем, что достоверность контроля по мере увеличения интервалов снижается. Допустим, что в момент t_i выполнена операция контроля нагрузки электростанции и установлено, что она находится в зоне $\{PH, PD\}$ рис. 2.

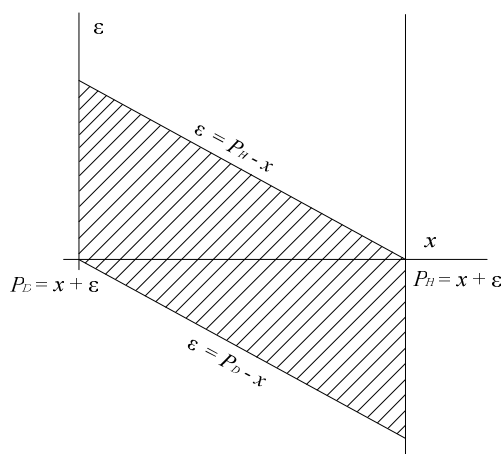


Рисунок 2 - Композиция $F(x)$ и $\theta(\varepsilon)$

В этом случае оценкой результата контроля может служить вероятность p ($x \in r$) того, что при $t_i+1 = t_i + \Delta t$ нагрузка не выйдет за пределы $\{P_H, P_D\}$, т.е. будут выполнены условия.

$$x_{PD} \leq x(t_i + \Delta t) \leq x_{PH}, \tag{1}$$

где $x(t_i + \Delta t) = \dot{x}(t_i)\Delta t$, а $\dot{x}(t_i)$ – производная.

Вероятность $p(x(t_i + \Delta t))$ зависит от ширины интервала r , динамических свойств нагрузки и значения $x(t_i)$. Она может быть найдена интегрированием условной плотности $f(x, \dot{x}/x_{PD}) < x < x_{PH}$ по областям I и II, рис. 3.

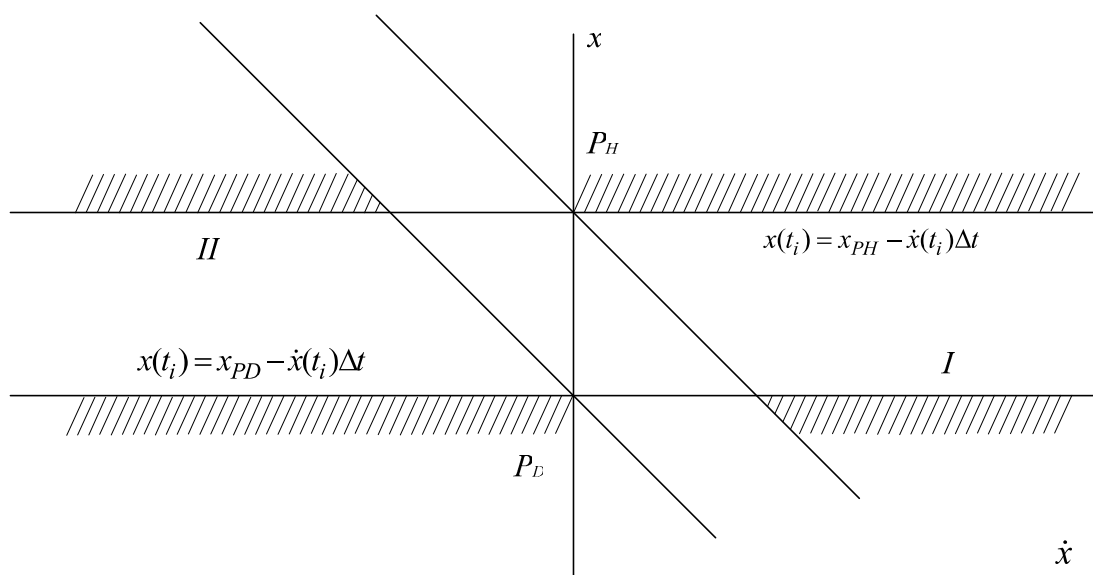


Рисунок 3 - Композиция $f_1(x)$ и $f_2(x)$

Если предположить, что распределение \dot{x} также нормально, то $f(x, \dot{x}) = f_1(x)f_2(x)$ (2)

где
$$f_1(x) = \frac{1}{p\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x - M_x^2)^2}{2\sigma_x^2}\right); f_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\dot{x}}} \exp\left(-\frac{\dot{x}^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

Вероятность 1 - p может быть найдена как

$$1 - p = \int_{x_{PH} - \dot{x}\Delta t}^{(x_{PH} - x_{PD})/\Delta t} f_2(\dot{x})d\dot{x} \int_{x_{PD}}^{x_{PH}} f_1(x/x_{PD}, x_{PH})dx + \int_{(x_{PH} - x_{PD})/\Delta t}^{\infty} f_2(\dot{x})d\dot{x} \int_{x_{PD}}^{x_{PH}} f_1(x/x_{PH}, x_{PD})dx + \int_{x_{PD}}^{(x_{PD} - x_{PH})\Delta t} f_2(\dot{x})d\dot{x} \int_{x_{PD}}^{x_{PH}} f_1(x/x_{PD}, x_{PH})dx.$$

При малых Δt , рис. 4, вероятность p будет равна $p_0 = 1 - \Delta t(dp/d(\Delta t))\Delta t = 0$, отсюда

$$\Delta t = \frac{t - P_0}{(dp/d(\Delta t))\Delta t}$$

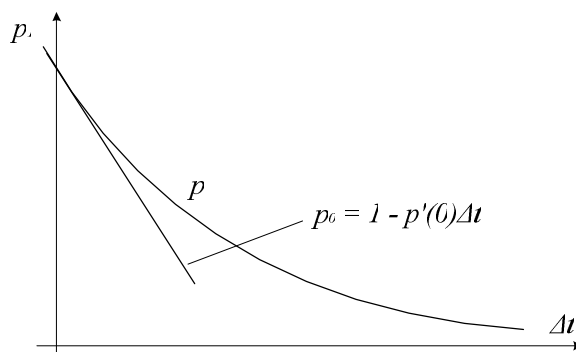


Рисунок 4 - График к определению вероятностей $p_0(\delta)$

Дифференцируя выражение 1 - p по Δt и подставляя его в выражение для Δt , можно получить допустимое значение интервала контроля как :

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{p(1 - p_0^*)}{\frac{\sigma_{\dot{x}}}{2\pi\sigma_x} \left(\exp\left(-\frac{(x_{PH} - M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) + \exp\left(-\frac{(x_{PD} - M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \right)},$$

где p и p_0^* - априорная и заданная вероятности нахождения контролируемой величины нагрузки.

Для приближенного определения интервала контроля при известной максимальной погрешности ε_{\max} и максимуме модуля первой производной контролируемой нагрузки можно воспользоваться результатами [9]:

$$\Delta t = \varepsilon_{\max} / (dx(t)/dt)_{\max}$$

При этом можно принять $\varepsilon_{\max} = 3\sigma\varepsilon$, а $(dx(t)/dt)_{\max}$ определить, проведя соответствующий анализ $f(\dot{x})$.

Этот подход применим также к исследованию режимов нагрузки электростанции в части анализа выбросов случайного процесса. Основными характеристиками выбросов нагрузки за верхний и ниж-

ний пороги могут быть:

$$T_{\Sigma PH} = \sum_i P_i t_i = E_{PH} T; \quad T_{\Sigma PD} = \sum_i P_i t_i = E_{PD} T$$

— суммарные длительности всех выбросов за уровни PH и PD в течение интересующего отрезка времени T , связанного с вполне определенным режимом работы судна (ход, стоянка и т.д.), E_{PH} , E_{PD} — вероятность выброса за время T ; $\bar{v}_{PH,PD} = N_{PH,PD} / T_{PH,PD}$ — средняя частота

выбросов; $\tau_{PH,PD} = 1/\bar{v}_{PH,PD}$ – средняя длительность выброса; $x_{\max}(\tau_{PH}) - x_{PH}$ или $x_{PD} - x_{\min}(\tau_{PD})$ – величина выброса.

Дальнейшие рассуждения будем вести только относительно выбросов за верхний уровень нагрузки РН. Важнейшими вопросами при этом являются определения закона распределения времени пребывания случайной функции выше заданного уровня и закона распределения числа выбросов.

Выход нагрузки за верхний предел описывается неравенством $x(t) + \dot{x}(t)dt > x_{PH}$ или $x_{PH} - \dot{x}(t)dt < x(t) < x_{PH}$

В таком случае вероятность выброса E_{PH} будет определяться выражением:

$$E_{PH}(x_{PH} - \dot{x}(t)dt < x(t) < x_{PH}) = \int_{0, x_{PH} - \dot{x}dt}^{\infty} \int_{x_{PH}}^{\infty} f(x(t), \dot{x}(t)) dx d\dot{x} \quad (3)$$

Поскольку $\dot{x}dt \ll x_{PH}$, т.е. пределы интегрирования отличаются мало, а также полагая, что вероятность выброса пропорциональна величине интервала времени, упростим выражение (3) и введем так же, как в работе [8] понятие временной плотности для вероятности выброса $l_{PH}(x_{PH}/t)$

$$l_{PH}(x_{PH}/t) = \int_0^{\infty} f(x_{PH}, \dot{x}/t) dx d\dot{x};$$

$$l_{PD}(x_{PD}/t) = \int_0^{\infty} f(x_{PD}, \dot{x}/t) dx d\dot{x}, \quad (4)$$

где $f(\dot{x}/t)$ – условная плотность распределения величины \dot{x} во времени.

В таком случае среднее время пребывания нагрузки выше заданного предела за промежуток времени T найдем

$$T_{\Sigma PH,PD} = \int_{0, x_{PH}}^T \int_0^{\infty} f(x/t) dx dt, \quad (5)$$

а средняя продолжительность одного выброса (наиболее важная с практической точки зрения характеристика)

$$\bar{\tau}_{PH} = \frac{\bar{T}_{\Sigma PH}}{N_{PH}} = \frac{\int_0^T \int_{x_{PH}}^{\infty} f(x/t) dx dt}{\int_0^T \int_0^{\infty} f(x_{PH}, dx/t) dx dt} \quad (6)$$

Если теперь предположить, что условная плотность распределения ординат случайной функции $f(x/t)$ и функции $f(dx/t)$ не зависят от времени, то задача в поиске $\bar{\tau}_{PH}$ значительно упрощается. В этом случае аналогично (2) законы распределения $f(x)$ и $f(x, \dot{x})$ однозначно выражаются через математическое ожидание Mx и дисперсии σ_x и $\sigma_{\dot{x}}$, поскольку математическое ожидание производной $M\dot{x}$ вследствие стационарности случайного процесса равно нулю.

Дисперсию $\sigma_{\dot{x}}^2$ определим через корреляционную функцию скорости в нуле ($\tau=0$) [9]

$$\sigma_x^2 = -\frac{d^2 K_x(r)}{dt^2} \Big|_{\tau=0}$$

В результате преобразований получим

$$T'_{\Sigma PH} = T \int_{x_{PH}}^{\infty} f(x) dx; \quad N'_{PH} = T \int_0^{\infty} dx f(x, \dot{x}); \quad \bar{\tau}'_{PH} = \frac{\int_0^{\infty} f(x) dx}{\int_0^{\infty} dx f(x, \dot{x})}; \quad (7)$$

$$v_{PH} = \frac{N'_{PH}}{T} = \frac{\sigma_{\dot{x}}}{2\pi\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x_{PH} - M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right);$$

$$\tau'_{PH} = \pi \frac{\sigma_x}{\sigma_{\dot{x}}} \exp\left(-\frac{(x_{PH} - M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \left(1 - \Phi\left(\frac{x_{PH} - M_x}{\sigma_x}\right)\right), \quad (8)$$

где $\Phi(z) = \Phi(Mx, \sigma_x, x_{PH})$ – функция Лапласа

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-x^2/2} dx, \quad z = \frac{x_{PH} - M_x}{\sigma_x},$$

Следует отметить, что, пользуясь таблицами функций Лапласа $\Phi(z)$, можно подсчитать вероятность обратного попадания прогнозируемой нагрузки $x \in N(Mx, \sigma_x)$ в интервал x_{PH}, x_{PD} . Для этого надо

сначала рассчитать $z_1 = \frac{x_{PD} - M_x}{\sigma_x}$ и $z_2 = \frac{x_{PH} - M_x}{\sigma_x}$, а затем с помощью таблиц найти $\Phi(z_1)$ и $\Phi(z_2)$. В таком случае вероятность

$$p(x_{PD} < x < x_{PH}) = \Phi(z_2) - \Phi(z_1) \quad (9)$$

При управлении составом ГА с использованием накопителей электроэнергии может понадобиться прогноз энергии, необходимой для обеспечения выброса нагрузки выше заданного уровня. В таком случае можно воспользоваться результатами работы [8], в которой средняя площадь \bar{S} , ограничена реализацией нормальной и стационарной случайной функции выше заданного уровня x_{PH} за время выброса, определяется по формуле 10:

$$\bar{S} = \frac{\sigma_x^2 \sqrt{2\pi}}{\sigma_{\dot{x}}} + \frac{(\bar{x} - x_{PH})\sigma_x \pi}{\sigma_{\dot{x}}} \left(1 - \Phi\left(\frac{x_{PH} - \bar{x}}{\sigma_x}\right) \exp\left(-\frac{(x_{PH} - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right) \right) \quad (10)$$

Здесь уместно рассмотреть также запрос оценки глобального математического ожидания Mx нагрузки на рассматриваемом интервале, которое хранится в памяти компьютера и должно периодически корректироваться, если требуют этого результаты оценки. Для этой цели воспользуемся методом Монте-Карло. В таком случае память компьютера должна иметь также средневыборочное значение x нагрузки за последние $N > 10$ наблюдения. Считая, что распределение случайных значений \bar{x} асимптотически нормально и учитывая известное правило «трех сигм»

$$P(|M_x - \bar{x}| < 3 \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}) \approx 2\Phi_0(3) \approx 0,997,$$

сформулируем условия необходимости коррекции глобального математического ожидания в виде предиката Π_{Mx}

$$\forall M_x \forall \bar{x} \forall \sigma_x \forall N \left(|M_x - \bar{x}| > 3 \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \right) \rightarrow \Pi_{Mx}(M_x, \bar{x}, \sigma_x, N) \quad (11)$$

где
$$\sigma_x \approx \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}$$

Для получения достоверных вероятностных характеристик процесса нагрузки необходимо располагать достаточно большим числом ее реализаций. В таком случае статистические оценки характеристик Mx и $Kx(\tau)$ получают путем осреднения по множеству реализаций в разных сечениях функции $x(t)$. Однако их можно получить также путем осреднения по времени одной единственной реализации достаточно большой протяженности, если считать процесс эргодиче-

ским. Тогда статическую оценку постоянного математического ожидания найдем простым осреднением.

$$m_x^* = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \tag{12}$$

а для определения оценки корреляционной функции служат формулы:

$$K_x^*(t) = \frac{1}{T-t} \int_0^{T-t} (x(t) - m^*(x))(x(t+\tau) - m_x^*) dx;$$

$$K_x^*(t) = \frac{1}{m-n-1} \sum_{i=1}^{m-n} (x(t_i) - \bar{x})(x(t_i + \tau) - \bar{x}), \tag{13}$$

где m – количество интервалов квантования на всем интервале T , а n – количество интервалов квантования на интервале τ .

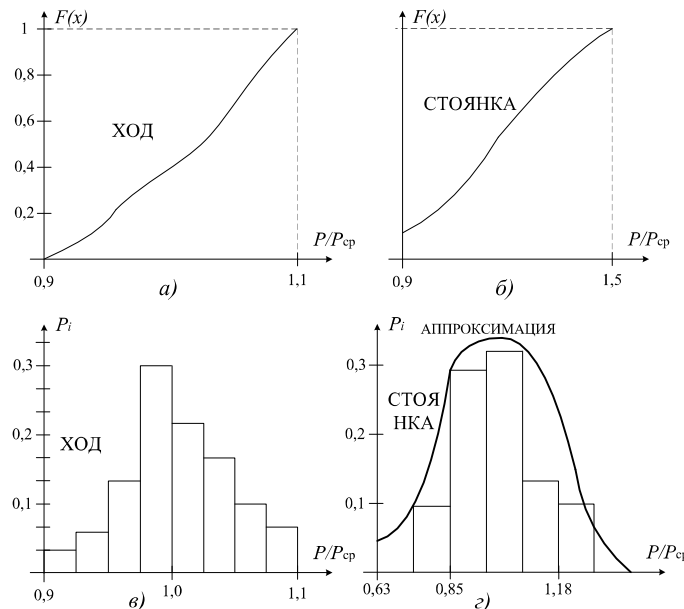


Рисунок 5 - а) и б) – Интегральный закон распределения нагрузки;
 в) – гистограммы нагрузки;
 г) – аппроксимация нормальным распределением

Подчеркнем, что эти формулы справедливы, в предположении эргодичности процесса, о которой можно судить по поведению его корреляционной функции. Так если $K_x(\tau)$ сходится к нулю на конечном интервале τ , то этот факт служит достаточным условием эргодичности самого процесса $x(t)$, рис. 6, $|K_x(\tau)| \leq 0,05$.

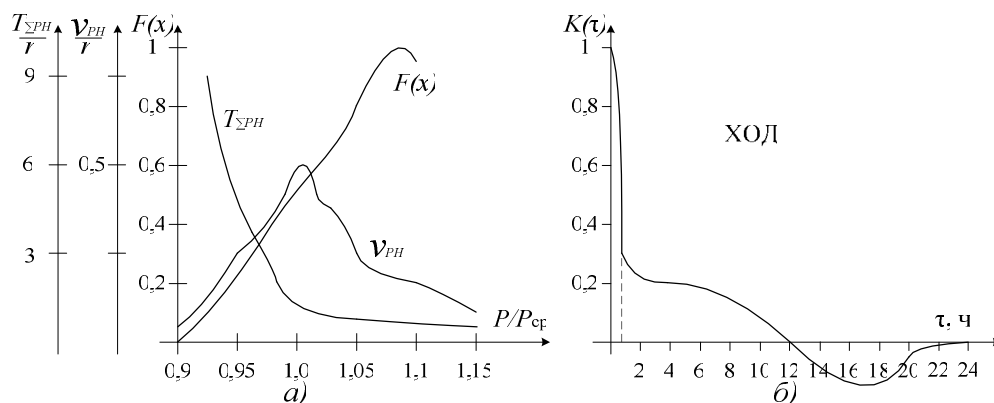


Рисунок 6 - а) Результаты моделирования экспериментальных данных характеристик нагрузки; б) – нормированная корреляционная функция, вычисленная по множеству реализаций

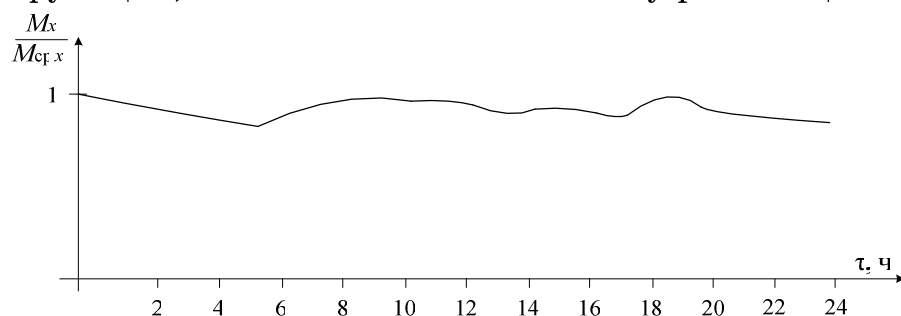


Рисунок 7 - Суточные колебания матожиданий относительно средних значений

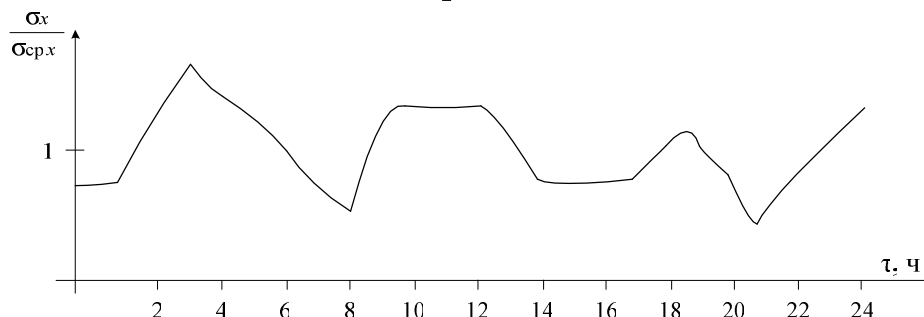


Рисунок 8 - Суточные колебания стандартного отклонения относительно средних значений

На рис. 5-8 приведены результаты статистической обработки экспериментальных исследований ходового режима и режима стоянки электростанции судна «Bar Protector». СЭЭУ судна «Bar Protector» имеет следующие характеристики: 5 дизель-генераторов мощностью 1275 кВт каждый, 2 гребных электродвигателя с винтом фиксированного шага, мощностью 1685 кВт каждый, 3 подруливающих устройства мощностью 560 кВт каждый.

Исследования проводились методом эксперимента в ходовом и стояночном режимах путем снятия замеров нагрузки электростанции каждые 15 минут в течение суток. Количество итераций эксперимента не менее трех.

В целом результаты проведения эксперимента подтвердили обоснованность предложенного метода измерения нагрузки с использованием вероятностных характеристик.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В работе приведен метод измерения и контроля нагрузки электростанции с использованием вероятностных характеристик, позволяющий контролировать нагрузку судовой электростанции и прогнозировать ее дальнейшее изменение. Получены выражения для определения матожидания, дисперсии и среднего времени выброса нагрузки электростанции за ее допустимый предел.

Опытным путем получены: интегральный закон распределения нагрузки; гистограммы нагрузки; экспериментальные характеристики нагрузки; нормированная корреляционная функция, вычисленная по множеству реализаций; суточные колебания матожиданий относительно средних значений, а также колебания стандартного отклонения нагрузки относительно средних значений судна «Bar Protector».

Полученный метод, выражения и характеристики в дальнейшем целесообразно использовать при разработке высокоэффективных систем управления СЭЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В.А. Верификация функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В.А. Шевченко // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб., 2015, Вып. 21, с. 70-76.
2. Шевченко В. А. Способ верификации функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В. А. Шевченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науч. -техн. сб., 2015, Вып. 1, с. 296-301.
3. Захарченко В.Н. Решение задач управления судовой электроэнергетической установкой при изменении нагрузки / В.Н. Захарченко, В.А. Шевченко // Судовые энергетические установки: науч. –техн. сб. – 2015. – Вып. 36. Одесса: ОНМА. – С. 74-82.
4. Ranganathan P. Recipe for efficiency: Principles of power-aware computing. ACM Commun. 2010;53:60–67.
5. Budashko, V.V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №2. – P. 62 – 72. Doi:10.20998/2074-272X.2017.2.10.
6. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi: 10.15587/1729–4061.2016.72543.
7. Шевченко В.А. Алгоритм быстрой оценки параметров судовых электроэнергетических систем // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – 2018. – №3(244). – С. 136 – 141.
8. Супрун Г.Ф. Синтез систем электроэнергетики судов / Г.Ф. Супрун. О Л.: Судостроение, 1983. - 244 с.
9. Самулеев В.И. Сравнительный анализ методов расчета мощности судовой электростанции / В.И. Самулеев Т.Н. Гусакова, В.П. Епифанов / ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Секция XVI. Электрооборудование объектов водного транспорта – 2015, с. 191-199.