

В.П. Калинин, канд. техн. наук, доцент, А.В. Мейта, канд. техн. наук
 Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДРОБИЛЬНО-ПОМОЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В работе рассматривается процедура определения шага дискретизации измерений, который удовлетворял бы как требованиям к качеству контроля процесса, так и возможностям аппаратных средств. На основе исследований и априорной информации были проведены расчеты длительности интервалов дискретизации и минимальных объемов выборок случайных процессов электрических нагрузок дробильно-помольных комплексов. При заданной точности измерений равной 10 % расчетный период дискретизации для анализа электропотребления объектов дробильно-помольного комплекса составляет 10 минут.

Ключевые слова: дробильно-помольный комплекс, дискретизация, интервал измерения, электропотребление.

Введение. Физический процесс электропотребления является непрерывной функцией времени. Для измерения и дальнейшей обработки информации об электропотреблении с помощью цифровых технических средств необходимо преобразовать исследуемый процесс в дискретную форму. Правильный выбор интервала дискретизации Δt позволяет с достаточной степенью точности восстановить значение исследуемой функции в интервалах между замерами.

Исследование электрических нагрузок в дробильно-помольном комплексе производится для установления закономерностей электропотребления и решения проблемы автоматического управления технологическим процессом электропотребления.

Построение системы автоматического управления технологическими процессами электропотребления связано с необходимостью статистического анализа натуральных графиков электрических нагрузок, полученных за определенный промежуток времени для различных режимов работы комплекса.

Цель и задачи исследования. Основными характеристиками изменения нагрузки являются математическое ожидание и корреляционная функция. Большинство типовых графиков нагрузки характеризуются экспоненциальной (1) либо экспоненциально-косинусной (2) корреляционными функциями [1].

$$K(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|}, \quad (1)$$

$$K(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cdot \cos \omega_0 \cdot \tau. \quad (2)$$

Основными параметрами корреляционных функций являются дисперсия D , коэффициент затухания α и частота ее колебаний ω_0 . Как известно [1], математическое ожидание m_P и корреляционную функцию K_P случайного процесса $P(t)$ определяют по выражениям

$$m_P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad (3)$$

$$K_P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T-\tau} [P(t+\tau) - m_P] \cdot [P(t) - m_P] dt. \quad (4)$$

Вероятностные характеристики - математическое ожидание, дисперсия и др. - определяются точно лишь при бесконечном количестве реализаций при усреднении по ансамблю или на бесконечном отрезке времени при временном усреднении. В действительности приходится ограничиваться конечным количеством реализаций или интервалом времени. Поэтому всякая вычисленная по экспериментальным данным статистическая характеристика отличается от теоретической вероятностной [2]. Непрерывный случайный процесс может быть заменен дискретной последовательностью случайных величин, а его вероятностные характеристики превращаются в последовательность оценок этих величин. Дискретизация по времени широко применяется при исследовании случайных процессов.

Сравнение аналоговых и дискретных систем показывает, что последние на сегодняшний день получили более широкое распространение по причине своей большей надежности и лучших стоимостных показателей [3, 4]. В цифровых системах используются различные методы дискретизации входных сигналов. При выборе способа описания процессов в дискретной форме необходимо определить период дискретизации, который зависит от требуемой точности восстановления процессов по дискретным данным. При организации контроля осредненной за период T мощности необходимо выбирать такой шаг дискретизации, который бы обеспечивал адекватное представление протекающего процесса. Очевидно, наиболее простой способ достижения такой цели – это выбор достаточно малого шага дискретизации. Однако излишняя обработка информации нежелательна с точки зрения функционирования системы.

Таким образом, возникает задача определения такого шага дискретизации, который удовлетворял бы как требованиям к качеству контроля процесса, так и возможностям аппаратных средств. При этом, величина шага дискретизации должна быть выбрана из разумного компромисса между требованиями точности и экономичности.

Результаты исследований. Рассмотрим вопрос оценки необходимой длины реализации случайного процесса, исходя из требуемой точности определения расчетных электрических нагрузок. Погрешность определения расчетного тока нагрузки (величины, используемой для определения потребляемой мощности) обусловленная неточностью исходных данных [5, 6]:

$$\Delta = \frac{m_I}{I_P} \cdot \frac{\partial I_P}{\partial m_p} \cdot \Delta m_p + \frac{D_I}{I_P} \cdot \frac{\partial I_P}{\partial D_I} \cdot \Delta D_P, \quad (5)$$

где Δm_I - относительная погрешность определения математического ожидания тока нагрузки, ΔD_I - относительная погрешность определения дисперсии тока нагрузки.

Полагая в общем виде:

$$I_P = m_I \cdot \sqrt{1 + \nu \cdot V_I^2}, \quad (6)$$

где $V_I = \frac{\sqrt{D_I}}{m_I}$ - коэффициент вариации тока нагрузки; ν - коэффициент, учитывающий инерционность нагрева и ухудшение качества изоляции, получаем

$$\Delta = \Delta m_I + \frac{\nu \cdot V_I^2}{2 \cdot (1 + \nu \cdot V_I^2)} \Delta D. \quad (7)$$

При максимальном значении $\nu = 18$ [2] получаем

$$\Delta = \Delta m_I + \frac{9 \cdot V_I^2}{(1 + 18 \cdot V_I^2)} \Delta D. \quad (8)$$

Погрешности определения математического ожидания и дисперсии случайного процесса с экспоненциально – косинусной корреляционной функцией [7]:

$$\Delta m_I = \frac{V_I}{\sqrt{2 \cdot \alpha \cdot T}}, \quad (9)$$

$$\Delta D_I = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot T}}. \quad (10)$$

где T – длительность реализации.

Из выражений (8) - (10) определяется необходимая длина реализации случайного процесса в зависимости от требуемой погрешности определения расчетной нагрузки:

$$T = \frac{V_I^2}{\alpha \cdot \Delta^2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{9 \cdot V_I^2}{1 + 18 \cdot V_I^2} \right). \quad (11)$$

Таким образом, необходимая длина реализации случайного процесса определяется его коэффициентом вариации и коэффициентом затухания корреляционной функции.

Основопологающей теоремой дискретного регулярного представления является теорема Котельникова [8]. Согласно этой теореме, непрерывное значение случайной функции может быть представлено ее дискретными выборками, при условии, что процесс наблюдается бесконечное время ($T \rightarrow \infty$), а также имеет ограниченный спектр частот (от 0 до F_c).

Восстановление исследуемого процесса осуществляется с помощью ряда

$$\lambda(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda(k \cdot \Delta t) \cdot \frac{\sin \varpi_c \cdot (t - k \cdot \Delta t)}{\varpi_c \cdot (t - k \cdot \Delta t)}, \quad (12)$$

где $\lambda(k \cdot \Delta t)$ - мгновенное значение сигнала в моменты $t = k \cdot \Delta t$; ϖ_c - граничная частота частотного спектра исследуемого сигнала; $\Delta t = \frac{\pi}{\varpi_c} = \frac{1}{2 \cdot F_c}$ - интервал дискретизации.

Как правило [9], заданными являются наивысшая частота в спектре исследуемого сигнала, разрешение по частоте, точность вычисляемых спектральных оценок. При этих исходных данных необходимо правильно выбрать следующие параметры: Δt - шаг дискретизации; N - число точек реализации; m - число ординат оценки корреляционной функции, характеризующее интервал корреляции случайного процесса.

Параметры Δt , N , m определяют количество обрабатываемой информации и необходимое время вычисления. Относительную среднеквадратическую ошибку используемой оценки определяет отношение $\frac{m}{N}$. Так для обеспечения точности $\varepsilon = 1\%$ необходимо, чтобы $\frac{N}{m} \geq 10^4$.

Выбор метода записи графиков электрических нагрузок в каждом отдельном случае производится в соответствии с решаемой задачей. Для анализа режимов электропотребления в дробильно-помольных комплексах за длительные циклы времени, связанные с необходимостью получения больших объемов информации, более целесообразен второй метод, так как он обеспечивает удобную с точки зрения обработки информации запись непрерывных графиков нагрузки последовательного ряда усредненных значений.

Проблема получения информации о процессах изменения нагрузок за время длительных периодов, кроме решения задачи выборочного статистического исследования нагрузок, в последние годы обрела ряд новых аспектов, связанных со стремительным развитием энергетики и средств вычислительной техники и внедрением электронных счетчиков. Одним из основных вопросов проведения экспериментальных исследований по определению вероятностных характеристик случайных процессов является выбор длительности измерений, интервалов дискретизации и периода квантования.

Длительность измерений параметров потоков электроэнергии и мощности находится из выражения

$$T_B = \frac{2\tau_k \cdot \nu^2}{\Delta^2}, \quad (13)$$

где τ_k - интервал корреляции, ν - коэффициент вариации случайного процесса, Δ - среднеквадратическая ошибка.

Стационарные случайные процессы электропотребления в промышленности есть эргодическими, если их корреляционная функция уменьшается по модулю с ростом аргумента. Большинство графиков электрических нагрузок основных потребителей промышленных предприятий характеризуются экспоненциальными корреляционными функциями:

$$R(\tau) = e^{-\frac{|\tau|}{T_k}}, \quad (14)$$

где T_k - постоянная времени корреляции.

Интервал корреляции определяется из выражения:

$$\tau_k = \frac{1}{\alpha \cdot (1 + m^2)}, \quad (15)$$

где α - коэффициент угасания корреляционной функции, $m = \frac{\omega_0}{\alpha}$ - кратность коэффициентов корреляционной функции, ω_0 - круговая (собственная) частота корреляционной функции.

Преобразование непрерывной реализации случайного процесса, включает в себя дискретизацию по времени и квантование по амплитуде (уровню). Интервал дискретизации выбирается исходя из требований по точности описания корреляционной функции, а так же скорости записи случайного процесса и особенностей носителей информации.

Интервал дискретизации по времени определяется согласно теореме Котельникова, из выражения:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2F_{\max}}, \quad (16)$$

где $F_{\max} = \frac{1}{T_{\min}}$ - максимальная частота процесса, которая соответствует минимальному периоду.

Непрерывная реализация вероятностных характеристик мощностей графиков электропотребления определяется выборками, взятыми с интервалами Δt , в виде последовательных выборок в дискретные моменты времени $K\Delta t$ с интервалом между ними. Объем выборок существенно влияет на точность определения вероятностных характеристик и корреляционных функций графиков электрических нагрузок. Дисперсия оценки математического ожидания мощности $P(t)$ для нормируемой корреляционной функции с учетом дискретизации

$$D[M[P]] = \frac{D[P]^2}{N} \left[1 + 2 \sum_{K=1}^{N-1} \left(1 - \frac{K}{N}\right) \rho(K\Delta t) \right], \quad (17)$$

где N - число значений дискретной последовательности, которая связана с Δt соотношением $\Delta t = T/(N-1)$, K - число интервалов дискретизации, ρ - нормированная корреляционная функция.

Из приведенной формулы (17) следует, что при увеличении объема выборки N , т.е. при бесконечном делении интервала T , величина дисперсии $D[M[P]]$ стремится к значению $D[P]$, что приводит к увеличению дисперсии. Таким образом, существует оптимальное число N_{\min} , которое минимизирует дисперсию оценки математического ожидания с учетом дискретизации. Минимальный объем выборки может быть рассчитан из выражения граничной ошибки выборки:

$$N_{\min} = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (18)$$

где t - коэффициент доверия, зависящий от вероятности определения граничной ошибки, σ^2 - выборочная дисперсия, Δ - граничная ошибка.

На основе исследований и априорной информации были проведены расчеты длительности интервалов дискретизации и минимальных объемов выборок случайных процессов электрических нагрузок дробильно-помольных комплексов.

Согласно [9], приближенное значение Δt может быть определено из следующих формул:

$$N = \frac{3}{4} \cdot \frac{m}{\varepsilon^2}, \quad (19)$$

$$T = N \cdot \Delta t. \quad (20)$$

Откуда, преобразуя, получим выражения для определения интервала дискретизации:

$$\Delta t = \frac{4}{3} \cdot T \cdot \frac{\varepsilon^2}{m}. \quad (21)$$

Для определения периода дискретизации для объектов дробильно-помольного комплекса воспользуемся следующими исходными данными:

Длительность выборки полагаем равной времени работы цеха измельчения в сутки $T = 12$ часов. Достаточной точностью вычислений считаем $\varepsilon = 10\%$. Поскольку объекты комплекса обладают большой инерционностью, то принимаем $m = 1$, поскольку за время периода дискретизации изменений существенно влияющих на работу комплекса не происходит.

Тогда, согласно формуле (21) период дискретизации $\Delta t = 10$ мин.

Минимальные интервалы времени для графиков шаровой загрузки и качества помола, необходимые для построения адекватной модели измельчения, определяются исходя из технологических условий. Согласно требований к производству силикатного кирпича проверка качества измельченной смеси должна осуществляться один раз в час. Несоблюдение данного требования может привести к ухудшению качества изделия и его браковке. Износ мелющих тел за смену составляет величину до нескольких процентов от общей массы шаровой загрузки (в зависимости от условий измельчения и материала шаров). Догрузка мелющих тел для мельниц осуществляется раз в смену при остановке барабана, поэтому рационально будет осуществлять контроль за догрузкой именно с такой частотой.

Технологически установленные интервалы замеров по качеству помола и массе шаровой догрузки превышают период дискретизации принятый для электрических нагрузок, поэтому в качестве базового интервала дискретизации будет принят интервал для определения электрических нагрузок.

Выводы.

При получении экспериментальных зависимостей следует выбирать такой шаг дискретизации измерений, который удовлетворял бы требованиям к качеству контроля процесса и возможностям аппаратных средств. Основной теоремой дискретного регулирования является теорема Котельникова,

согласно которой непрерывное значение случайной функции может быть представлено ее дискретными выборками для бесконечного времени и ограниченного спектра частот. Реальные процессы наблюдаются на конечном интервале времени, что вносит дополнительные погрешности за счет отбрасывания выборок вне принятого интервала. Расчетный период дискретизации для анализа электропотребления объектов дробильно-помольного комплекса составляет 10 минут.

Список литературы.

1. Гайдукевич В. И. Случайные нагрузки силовых электроприводов [Текст]/ Гайдукевич В. И. Титов В. С. - М. Энергоатомиздат, 1983. – 160 с
2. Калинин В.П. Контроль и оперативное управление электропотреблением в промышленных сетях: Дис. канд. техн. наук: 05.14.02. – К., 1983. - 287с.
3. Ильин В.А. Телеуправление и измерение [Текст]/ Ильин В.А.. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
4. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения [Текст]/ Мирский Г. Я.. - М. Энергоатомиздат, 1982.
5. Саенко Ю. Л. Разработка уточненных методов выбора токоведущих частей и трансформаторов при резкопеременных нагрузках. Дис. канд. техн. наук.- Киев, 1986.
6. Жежеленко И.В. Оценка времени нагрева проводников изменяющимся во времени током/ Жежеленко И.В. Саенко Ю.Л. // Известия вузов. Сер. Энергетика. 1983. № 8. - С. 3 – 8.
7. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости [Текст]/ Котельников В.А.. – М.: Госэнергоиздат, 1956.-151 с.
8. Харкевич А.А. О теореме Котельникова/ Харкевич А.А.//Радиотехника, - 1956, т.13, № 8.
9. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента [Текст]/ Асатурян В.И. – М.: Радио и связь, 1983.-248 с.

V. Kalinchyk, O. Meyta

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

DETERMINATION OF SAMPLING INTERVAL DURING ELECTRICITY CONSUMPTION MODES STUDIES FOR CRUSHING-GRINDING COMPLEX UNITS

The paper considers a procedure for sampling interval determination to fulfill both requirements for process control quality and hardware features. Based on studies and prior information sampling interval duration was calculated. The calculations for minimal sample size for stochastic processes of electrical loads for crushing-grinding complex. For desired measurements accuracy of 10 % the calculated sampling interval for analysis of electricity consumption for crushing-grinding complex units is 10 minutes.

Key words: crushing-grinding complex, discretization, sampling interval, electricity consumption.

1. Gaidukevych V.I. Stochastic loads of power-by-wires [Text]/ Gaidukevych V.I., Titov V.S. – М.: Energoatomizdat, 1983. – 160 p.
2. Kalinchyk V.P. Control and operational management of electrical consumption for industrial networks: PhD dissertation: 05.14.02 – К., 1983. – 287 p.
3. Illin V.A. Remote control and measurements [Text]/ Illin V.A. – М.: “Energiia”, 1974. – 408 p.
4. Mirskiy G.Y. Characteristics of stochastic interrelation and their measurements [Text]/ Mirskiy G.Y. – М.: “Energoatomizdat”, 1982.
5. Saenko Y.L. Development of qualified methods for conductive parts and transformers selection at abruptly variable loads. PhD dissertation. – Kyiv, 1986.
6. Zhezhelenko I.V. Estimation of heating period for conductors changing in time current / Zhexhelenko I.V., Saenko Y.L. // HEI bulletin. Ser. “Energetika”. 1983. #8. – p. 3-8.
7. Kotelnikov V.A. Theory of potential immunity [Text] / Kotelnikov V.A. – М.: “Gosenergoizdat”, 1956. – 151 p.
8. Kharkevich A.A. on Kotelnikov’s theory / Kharkevich A.A. // “Radiotekhnika”, - 1956, v.13, #8.
9. Asaturian V. I. Experimental design theory [Text] / Asaturian V.I. – М.: “Radio and connection”, 1983 – 248 p.

Надійшла 19.04.2015

Received 19.04.2015