Ю. Б. Сениченков. — СПб. : БХВ-Петербург, 2007. — 352 с. — ISBN 5-94157-580-7.

2.Brenan, K. E. Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations / K. E. Brenan, S .L. Campbell, L. R. Petzold. — Philadelphia : SIAM, 1996. — 256 p.

3.Ковалёв, Ю. З. Разработка алгоритмов исследования динамики обобщенного электромеханического преобразователя энергии на ЭЦВМ : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.01 / Юрий Захарович Ковалёв. — Москва, 1980. — 415 с.

4.Ковалёв, В. З. Моделирование электротехнических комплексов и систем как совокупности взаимодействующих подсистем различной физической природы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / В. З. Ковалёв. — Омск, 2000. — 370 с.

5.Rosenbrock, H. H. Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations / H. H Rosenbrock // Computer J. — 1963 — vol. 5, pp. 329—330.

6.Артемьев, С. С. Численные методы решения задачи Коши для систем обыкновенных и стохастических дифференциальных уравнений : моногр. / С. С. Артемьев ; под ред. Г. А. Михайлова. — Новосибирск : [б. и.], 1993. — 156 с.

7.Хайрер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи / Э. Хайрер, Г. Ваннер : пер. с англ. — М. : Мир, 1999. — 685с. — ISBN 5-03-003117-0.

**САВЧЕНКО Антон Анатольевич**, ассистент кафедры энергетики Академического института прикладной энергетики, г. Нижневартовск.
Адрес для переписки: e-mail: gruzo-work@yandex.ru
**КОВАЛЁВ Александр Юрьевич**, кандидат технических наук, директор Нижневартовского филиала Омского государственного технического университета.
Адрес для переписки: e-mail: gruzo-work@yandex.ru

**Статья поступила в редакцию 04.06.2012 г.**


**УДК 621.318**

**М. В. СЕМЕНЯК**
**В. К. ФЁДОРОВ**

**Омский государственный технический университет**

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

**В данной статье отражены канонические гармоники напряжения. Здесь определили коэффициенты несинусоидальности и пульсаций. Кроме того, в статье рассмотрены неканонические гармоники и энтропия.**

**Ключевые слова: канонические гармоники, математическое ожидание, дисперсия, неканонические гармоники, энтропия.**

Тенденция к широкому внедрению управляемых преобразователей УП определяется потребностями увеличения экономической эффективности производства. В то же время проявляется отрицательное влияние применения УП на электрические параметры СЭОУ (наличие высших гармоник в кривых напряжения и тока).

Искажение синусоидальности кривой напряжения характеризуется коэффициентом гармоник

$$K_Г = \frac{\sqrt{\sum_{\nu} U_{\nu}^2}}{U_1}, \quad (1)$$

где $U_{\nu}$, $U_1$ — соответственно действующее значение ν-ой и основных гармоник напряжения.

В соответствие с ГОСТ-13109-2007 на качество электроэнергии коэффициент гармоник не должен превышать 5%. Но как показали многочисленные экспериментальные исследования [1—3] в электрических сетях со значительным удельным весом статических преобразователей несинусоидальность напряжения значительно превышает допустимые 5 %.

**Канонические гармоники.** В установившемся режиме α=const УВП может быть представлен как некоторый генератор, дающий на входе постоянную и переменную составляющую ЭДС. Постоянная составляющая определяется выражением [4]

$$E_d(\alpha) = \frac{m}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{m}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{m}+\alpha} E_{фм} \sin\omega_0 t \, d\omega_0 t = E_d(0)\cos\alpha, \quad (2)$$

где $E_d(0)$ — максимальная выпрямленная ЭДС, равная

$$E_d(0) = \frac{m}{\pi} \cdot E_{фм} \sin\frac{\pi}{m}, \quad (3)$$

где $E_{фм}$— амплитудное значение фазной ЭДС, $m$ — число фаз преобразователя, $\omega_0$ — круговая частота питающего напряжения.

Переменная составляющая ЭДС $E(\alpha)$, играющая роль помехи, имеет гармонические колебания, зависящие от угла α

$$E(\alpha) = \sum_{K=1}^{\infty} E_{MK}(\alpha) \sin(Km\omega_0 t + \varphi_K), \quad (4)$$

где $E_{MK}(\alpha)$ — амплитуда $K$-й гармоники, равная

$$E_{MK} = \frac{2E_d(0)}{(km)^2 - 1} \cdot \sqrt{\cos^2\alpha + (km)^2 \cdot \sin^2\alpha}, \quad (5)$$

$\varphi_K$ — фазовый сдвиг $K$-й гармоники относительно момента открывания вентиля

$$\varphi_K = arctg\frac{1}{kmtg\alpha}. \quad (6)$$

При расчётах спектрального состава первичного линейного (переменного) и выпрямленного токов вводятся два допущения:

а) трёхфазная система линейных напряжений симметрична;

б) в цепи постоянного тока имеется сглаживающий реактор.

Результирующие коэффициенты несинусоидальности и коэффициент пульсаций определим как

$$K_{HC} = \sqrt{(K^a{}_{HC})^2 + (K^K{}_{HC})^2}, \quad (7)$$

$$K_{\Pi} = \sqrt{(K^a{}_{\Pi})^2 + (K^K{}_{\Pi})^2}, \quad (8)$$

где $K^к_{нс}$, $K^к_{П}$, $K^a_{нс}$, $K^a_{П}$ — соответственно коэффициенты несинусоидальности и пульсаций, обусловленные действием канонических и нормальных гармоник напряжения.

При случайном изменении суммарной нагрузки первичный (выпрямленный) ток представляется случайным процессом. Параметры гармонических ЭДС УВП остаются при этом детерминированными величинами. Для совершенствования методик расчёта и изменения параметров несинусоидальных режимов, а также для выбора рациональных методов и средств снижения уровней гармоник в электрических сетях важное значение имеет установление закономерностей, характеризующих изменение во времени гармоник тока и напряжения и эквивалентных их значений при случайном изменении суммарной нагрузки УВП. Известно, что случайный процесс изменения гармоник тока и напряжения в промышленных электрических сетях является стационарным в широком смысле [1, 5], это позволяет анализировать стохастические процессы в рамках спектрально-корреляционной теории случайных процессов.

Ниже рассматриваются корреляционные функции и спектральные плотности указанных процессов для отдельных гармоник и их эквивалентных значений, а также соответствующие частотные характеристики и законы распределения.

Регистограммы процессов изменения отдельных гармоник тока во времени отдельно строились с помощью анализатора гармоник. При обработке регистограмм процесс $I_\nu(t)$ задавался цифровой последовательностью с шагом квантования $\Delta t$, связанным с минимальной длительностью реализаций соотношением

$$\Delta t = \frac{T}{n},$$

где $n$ — число точек дискретной последовательности.

Значение $T$ определялось по выражению

$$T = \frac{2}{\eta_0 \cdot n_0},$$

где $\eta_0 = 0{,}05 - 0{,}1$ — относительная среднеквадратическая погрешность определения корреляционной функции, $n_0$ — число пересечений функций $I_\nu(t)$ линии математического ожидания в единицу времени.

Для исследуемых процессов $n_0 = 0{,}2c^{-1}$, при $\eta_0 = 00{,}5$ получаем $T = 200$ с. Шаг квантования, опре-

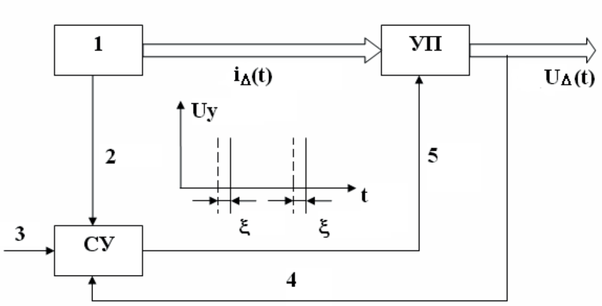


**Рис. 1. Возникновение анормальных гармоник в линейном токе и выпрямленном напряжении:**
**1 — источник энергии, 2 — опорное напряжение,**
**3 — вход системы управления, 4 — обратная связь,**
**5 — управляющие импульсы**

делённый по теореме Котельникова, $\Delta t = 0{,}2$ с (максимальная частота в спектре огибающей для прокатных станов $f_м = 2{,}5 \div 5$ Гц).

Число точек дискретной последовательности

$$n = \frac{T}{\Delta t} = 10000. \quad (9)$$

Числовые характеристики процессов $I_\nu(t)$ находились с помощью ЭВМ по следующим выражениям [6]: математическое ожидание —

$$m(I_\nu) = \frac{\sum_{k=1}^{n} I_{\nu k}}{n}, \quad (10)$$

дисперсия —

$$D(I_\nu) = \sigma^2 I_\nu = \frac{\sum_{k=1}^{n}(I_{\nu k} - m^2(I_\nu))^2}{n}, \quad (11)$$

где $\sigma^2 I\nu$ — среднеквадратическое отклонение процесса.

Нормированная корреляционная функция

$$K_\nu^H(\tau) = \frac{1}{n-m} \cdot \sum_{k=1}^{n-m} I_\nu(t_k) \cdot I_\nu(t_{k+m}). \quad (12)$$

Нормированная спектральная плотность

$$F_\nu^H(n \cdot \Delta f) = 2\Delta t[1 + 2\sum_{n=1}^{n-m} K_\nu^H(n\Delta t)\cos 2\pi f \Delta t], \quad (13)$$

где $\Delta f = \frac{1}{T} = 0{,}005$ Гц.

**Неканонические гармоники и энтропия.** В [7] показано, что в установившемся режиме работы управляемого выпрямителя при разбросе углов управления от установочных значений в системе импльсно-фазового управленая (ИФУ) в линейном токе выпрямителя наряду с каноническими появляются неканонические (анормальные) гармоники (рис. 1).

Отклонение моментов возникновения управляющих импульсов от установочных значений зачастую имеет случайный характер из-за разброса параметров отдельных элементов системы ИФУ, колебаний напряжения и нагрузки.

Для таких случайных процессов момент появления $t_n^{(к)}$ любого $n$-го импульса к-ой реализации процесса может быть представлен в виде:

$$t_n^{(к)} = n * T + \xi_n, \quad (14)$$

где $T$ — длина тактового интервала; $\xi_n$ — случайная величина с нулевым средним значением.

Отметим, что среднее значение $t_n$ любого $n$-го импульса равно установочному значению момента возникновения этого имцульса. При таких условиях работы системы ИФУ линейный ток выпрямителя можно считать стационарным случайным процессом, спектральный состав которого представляет собой ряд гармоник со случайными амплитудными и начальными фазами. Коммутация тока с одного вентиля на другой не нарушает стационарности линейного тока управляемого выпрямителя.

Представим линейный ток выпрямителя случайной стационарной функцией времени вида

$$\mathring{i}(t)=\sum_{n=2}^{\infty}(i_{cn}\cos n\omega t+i_{sn}\sin n\omega t), \quad (15)$$

где $i_{cn}$ и $i_{sn}$ образуют множество взаимно независимых случайных величин, каждая из которых имеет нулевое среднее значение. Закон распределения коэффициентов $i_{cn}$ и $i_{sn}$ предполагается таким, что вероятность того, что ряд (15) сходится, равна единице. Покажем, что коэффициенты $i_{cn}$ и $i_{sn}$ распределены по нормальному закону.

Для того, чтобы в этом убедиться, фиксируем произвольные значения n и рассматриваем заданное множество $C$ в плоскости $i_{cn}$, $i_{sn}$, которому принадлежит пара коэффициентов $(i_{cn}, i_{sn})$.

Если $i(t)$ — стационарный случайный процесс, то произвольный сдвиг во времени на величину $\tau$ должен оставить все вероятностные характеристики этого процесса без изменения. Поскольку

$$\begin{aligned}&i_{cn}\cos n\omega\cdot(t-\tau)+\\&+i_{sn}\sin n\omega\cdot(t-\tau)=(i_{cn}\cos n\omega\tau-\\&-i_{sn}\sin n\omega\tau)\cdot\cos n\omega t-\\&-(i_{cn}\sin n\omega\tau+i_{sn}\cos n\omega\tau)\cdot\sin n\omega t=\\&=i'_{cn}\cos n\omega t+i'_{sn}\sin n\omega t,\end{aligned} \quad (16)$$

то действие переноса на любую величину состоит в замене коэффициентов $(i_{cn}, i_{sn})$ новыми $(i'_{cn}, i'_{sn})$, определёнными описанным выше способом.

Из (16) видно, что точка $(i'_{cn}, i'_{sn})$ связана с точкой $(i_{cn}, i_{sn})$ поворотом около начала координат на угол $n\omega\tau$. Следовательно, если точка $(i_{cn}, i_{sn})$ принадлежит множеству $C$, то точка $(i'_{cn}, i'_{sn})$ принадлежит множеству $C_\tau$, представляющему собой множество $C$, повёрнутое на угол $n\omega\tau$ [8]

$$P\left[(i_{cn},i_{sn})\in C\right]=P\left[(i'_{cn},i'_{sn})\in C_\tau\right] \quad (17)$$

для всех $\tau$ и всех $C$.

Очевидно, что для удовлетворения (17) совместная плотность вероятности коэффициентов $(i_{cn}, i_{sn})$ должна зависеть только от радиального расстояния от начала координат

$$P(i_{cn}, i_{sn})=P(i^2_{cn}+i^2_{sn}), \quad (18)$$

где для удобства берётся квадрат радиуса $(i^2_{cn}+i^2_{sn})$ вместо самого радиуса и где $P$ — функция, которую надо отыскать. Пусть $P_1(i_{cn})$ и $P_2(i_{sn})$ — соответствующие плотности вероятности для $i_{cn}$ и $i_{sn}$ по отдельности. В силу независимости этих величин

$$P(i_{cn}, i_{sn})=P_1(i_{cn})*P_2(i_{sn}) \quad (19)$$

Приняв для удобства

$$P_1(i_{cn})=h_1(i^2_{cn}),\ P_2(i_{sn})=h_2(i^2_{sn}),$$

получим

$$P(i^2_{cn}+i^2_{sn})=h_1(i^2_{cn})*h_2(i^2_{sn}). \quad (20)$$

Причём (20) выполняется тождественно относительно $i_{cn}$ и $i_{sn}$. Предположив $i_{sn}=0$, найдём

$$P(i^2_{cn})=h_1(i^2_{cn})*h_2(0). \quad (21)$$

Аналогично

$$P(i^2_{sn})=h_1(0)*h_2(i^2_{sn}). \quad (22)$$

Таким образом, обе функции $h$ пропорциональны функции $P$, поэтому

$$P(i^2_{cn}+i^2_{sn})=\kappa*(i^2_{sn})*P(i^2_{sn}), \quad (23)$$

где $\kappa$ — коэффициент пропорциональности.

Откуда

$$\ln P(i^2_{cn}+i^2_{sn})=\ln\kappa+\ln P(i^2_{cn})+\ln P(i^2_{sn}) \quad (24)$$

для всех $i_{cn}$ и $i_{sn}$. Это справедливо лишь тогда, когда $\ln P(i^2_{cn})$ есть линейная функция своего аргумента, то есть

$$\ln P(i^2_{cn})=R*i^2_{cn}+R', \quad (25)$$

где $R$ и $R'$ — постоянные.

Таким образом, получаем

$$P(i_{cn},i_{sn})=P(i^2{}_{cn}+i^2{}_{sn})=r\cdot e^{-R\cdot(i^2{}_{cn}+i^2{}_{sn})}, \quad (26)$$

где $r$ — постоянная.

Из (26) видно, что $i_{cn}$ и $i_{sn}$ — независимые переменные и нормально распределённые косинусные и синусные коэффициенты высших гармоник.

Теперь вернёмся к (15) и представим его как

$$i(t)=\sum_{n=1}^{\infty}i_n\sin(n\omega t+\psi_n), \quad (27)$$

где $i_n$ — амплитуда анормальной n-й гармоники тока; $\psi_n$ — начальная фаза этой гармоники;

$$i_n=\sqrt{i^2{}_{cn}+i^2_{sn}},\quad tg\psi_n=\frac{i_{cn}}{i_{sn}},$$

где $i_n$ и $\psi_n$ — независимые случайные величины в силу независимости $i_{cn}$ и $i_{sn}$.

Найдём совместную плотность вероятности величин $i_n$ и $\psi_n$.

В общем случае

$$P(i_n,\psi_n)=i_n*P(i_{cn},i_{sn}), \quad (28)$$

где $i_n$ - якобиан преобразования от переменных $i_{cn}$, $i_{sn}$ к переменным $i_n$, $\psi_n$. Поэтому

$$P(i_n,\psi_n)=r\cdot i_n\cdot e^{-R\cdot i^2{}_n} \quad (29)$$

Это релеевский закон распределения. Закон распределения для $i_n$

Для $\psi_n$

$$P(i_n)=\int_0^{2\pi}P(i_n,\psi_n)d\psi_n=r^1\cdot i_n\cdot e^{R\cdot i_n^2}, \quad (30)$$

$$P(\psi_n)=\int_{-\infty}^{\infty}P(i_n,\psi_n)di_n=const. \quad (31)$$

Понятно, что $n$-я гармоника тока распределена по релеевскому закону; начальная фаза $n$-й гармоники подчинена равномерному распределению на отрезке $(\pi,\tau)$. Поскольку доказательство проведено для произвольного значения $n$, то оно справедливо для любого $n$.

**Библиографический список**


1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения металлургических заводов / И. В. Жежеленко // Электричество. — 1979. — № 11. — С. 37—43.
2. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. — М. : Энергия, 1977. — 126 с.
3. Исследование несинусоидальных кривых токов и напряжений в заводских системах электроснабжения : отчёт о НИР / Р. И. Борисов, В. К. Фёдоров. — Томск : ТПИ, 1976. — 68 с. — Гос. регистрация № 75060767.
4. Булгаков, А. А. Новая теория управляемых выпрямителей / А. А. Булгаков. — М. :Наука, 1970. — 211 с.
5. Литвак, В. В. Исследование несимметрии и несинусоидальности напряжения на Западно-Сибирском металлургическом заводе / В. В. Литвак, В. В. Прокопчик, В. К. Фёдоров // Кибернетика электроэнергетических систем : сб. науч. тр. — Вып. 4. — Томск : ТГУ, 1975. — С. 35—40.
6. Румшиский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшиский. — М. : Наука, 1971. — 157 с.
7. Красовский, А. А. Изменение энтропии непрерывных динамических систем / А. А. Красовский // Техническая кибернетика. — 1963. — Вып. 5. — С. 3—11.
8. Лэннинг, Д. Случайные процессы в задачах автоматического управления / Д. Лэннинг, Д. Бэттин. — М. : ИИЛ, 1958. — 349 с.



**СЕМЕНЯК Мария Владимировна**, аспирантка кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета (ОмГТУ), ассистент кафедры электротехники и электрификации сельского хозяйства Омского государственного аграрного университета им. П. А. Столыпина.
Адрес для переписки: e-mail: mary_semenyak@mail.ru
**ФЁДОРОВ Владимир Кузьмич**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий ОмГТУ.



**Статья поступила в редакцию 25 04.2012 г.**




**УДК 621.317**



**В. Ю. СЫСОЛЯТИН**

**Омский государственный технический университет**


# ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ЗАРЯДА—РАЗРЯДА ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА


**Рассматривается цифровое устройство, предназначенное для автоматизированного заряда аккумуляторов в разнополярном импульсном режиме в формате: заряд—пауза—разряд—пауза. Данное устройство позволяет устанавливать различные интервалы времени длительности каждой из фаз с одновременной индикацией их значений на жидкокристаллическом дисплее. В статье рассматриваются функциональная и принципиальная электрические схемы устройства, а также алгоритм функционирования программы.**



**Ключевые слова: заряд—разряд химического источника тока, блок-схема программы, принципиальная электрическая схема, микропроцессорное устройство.**


В процессе эксплуатации различных ХИТ (химических источников тока) важное значение имеет технология заряда кислотных аккумуляторов. В настоящее время в научных публикациях существует большой объем противоречивой информации, описывающей использование различных режимов заряда аккумуляторных батарей, а также их влияние на изменение характеристик аккумуляторов.

Кроме того, существующие простейшие технологии не учитывают всех особенностей физико-химических процессов, протекающих в аккумуляторе, и поэтому не являются оптимальными. Оптимальные технологии заряда достаточно трудоёмки и без автоматизации трудновыполнимы, поскольку у рядового пользователя зачастую нет времени, чтобы методично следить за многочасовыми процессами заряда и выполнять все процедуры.

**Целью данной работы является:**

—разработка структурной и принципиальной схемы цифрового устройства для широтно-импульсного заряда — разряда аккумуляторов;

—разработка алгоритма управляющей программы, обеспечивающей возможность изменения временных интервалов режима заряда и разряда в широких пределах, с целью изучения данного процесса.