

О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЁТА РЕЖИМА РАБОТЫ И ИМПЕДАНСА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЗОНАНСА ТОКОВ

Сиромаха С.С.¹, Осипов Д.С.¹, Черемисин В.Т.²

¹ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, г. Омск, просп. Мира, д.11), e-mail: plankov_al@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», Омск, Россия (644046, г. Омск, просп. К. Маркса, д.35).

Развитие техники и технологии предъявляет большие требования к работе электроэнергетического оборудования, одновременно с этим жизнедеятельность человека очень разнообразна, и поэтому разнообразно оборудование, помогающее жить человеку. В последнее время уделяется много внимания энергосбережению и энергоэффективности. Энергоэффективность в электрооборудовании – это снижение потерь электроэнергии в самом оборудовании, а также оптимизация режима работы оборудования, максимально соответствующего технологическому процессу. Для ученых становятся актуальными названные задачи. Процесс оптимизации режимов работы систем электроснабжения - это не только проблема соответствия режима работы какой-либо технологии, но и устранения негативных факторов, нарушающих протекание оптимального режима работы оборудования. В работе рассматривается совокупное влияние режима работы электроустановок и параметров качества электрической энергии на процесс возникновения резонанса в системе электроснабжения.

Ключевые слова: резонанс, качество электрической энергии, режим работы, энергосбережение.

ABOUT NEED OF THE ACCOUNTING OF THE OPERATING MODE AND IMPEDANCE OF SYSTEM OF POWER SUPPLY WHEN MODELLING THE RESONANCE OF CURRENTS

Siromakha S.S.¹, Osipov D.S.¹, Cheremisin V.T.²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia (644050, Omsk, Mira Avenue, 11), e-mail: siromaha83@mail.ru

²Omsk State University of Means of Communication, Omsk, Russia (644046, Omsk, K. Marx Avenue, 35).

Development of technology and technologies imposes big requirements to work of the electrical power equipment. Also recently it is paid much attention to energy saving. Energy saving in an energy drink is a decrease in losses of the electric power in the equipment, and also optimization of an operating mode of the equipment of the most corresponding to technological process. For scientists there are actual called tasks. By optimization of work of the equipment the problem of elimination of negative factors is solved. In work cumulative influence of an operating mode of electroinstallations and parameters of quality of electric energy on process of emergence of a resonance of currents in system of power supply is considered.

Keywords: resonance, quality of electric energy, operating mode, energy saving.

Практика работы отечественных и зарубежных промышленных предприятий свидетельствует о том, что батареи статических конденсаторов (БСК), работающие при несинусоидальном напряжении, в ряде случаев очень быстро выходят из строя в результате вспучиваний или взрывов. Причиной разрушения конденсаторов является постоянная перегрузка их токами высших гармоник (ВГ). Перегрузка происходит, как правило, при возникновении резонансного или близкого к нему режима на частоте какой-либо гармоники, имеющейся в амплитудном спектре напряжения сети. Резонансные контуры образуются ёмкостью БСК и индуктивностью сети [1].

Чтобы избежать преждевременного выхода из строя БСК в системах электроснабжения (СЭС), совместно с задачей компенсации реактивной мощности, где

присутствуют электроприёмники, искажающие синусоидальность формы кривой напряжения и тока, должна решаться задача устранения эффекта резонанса.

Наиболее часто применяемый способ защиты БСК от негативного действия высших гармоник является применение последовательно включенных реакторов (индуктивных сопротивлений). Последнее время достаточно широко стали применяться бестрансформаторные шунтирующие активные фильтры [5]. В работе [4] авторы предлагают компенсацию реактивной мощности с устранением эффекта резонанса при помощи комбинированной системы. Установка представляет собой соединённые в треугольник группы однофазных инверторов без трансформаторной связи, подключаемых совместно с БСК.

Таким образом, продолжает оставаться актуальной задача расчета, анализа и моделирования резонанса токов в системах электроснабжения, что позволит оптимизировать режим с точки зрения коэффициента мощности и реализации технических мероприятий по подавлению гармоник. Однако при исследовании резонанса токов редко принимаются во внимание активные составляющие комплексных сопротивлений СЭС и изменение параметров нормального режима работы системы. Известно, что полностью «установившегося режима» реально существовать не может. Нагрузка в системе колеблется: непрерывно происходят малые изменения (флуктуации) числа подключенных потребителей – их мощности и состава. Подобные изменения могут оказать существенное влияние на режим резонанса токов. Кроме того, при наличии БСК с регулированием количество переменных величин в уравнении частоты резонанса увеличивается. На примере данной работы покажем необходимость учета вышеперечисленных факторов для расчета и моделирования резонанса токов в СЭС.

Общие теоретические положения

Резонанс токов, как известно из теории цепей, возникает при параллельном соединении ветвей с разнохарактерными реактивными сопротивлениями. Для исследования резонансных явлений в системах электроснабжения составим следующую схему (рисунок 1), которая представляет собой фрагмент схемы электроснабжения промышленного предприятия и отражает требуемые параметры.

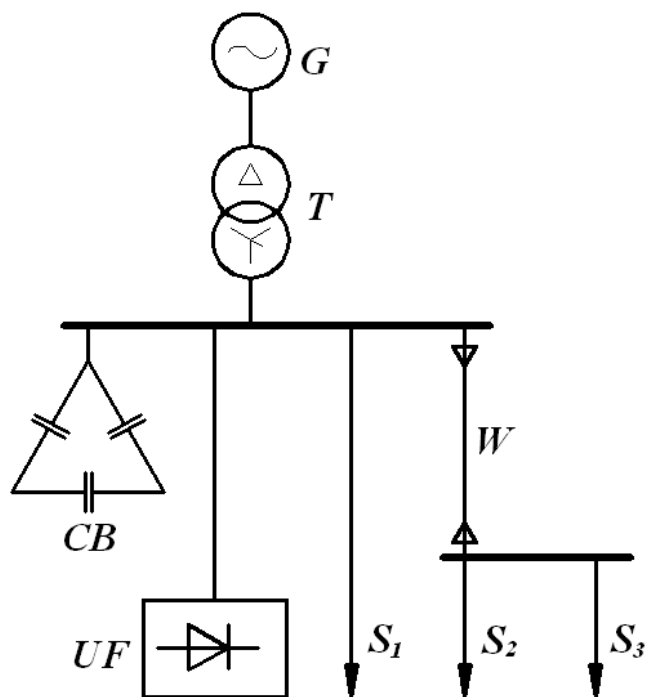


Рис.1. Однолинейная схема электроснабжения:

G – источник электрической энергии (система), T – трансформатор 10/0,4 кВ, CB – силовые конденсаторные батареи компенсации реактивной мощности, UF – нелинейная нагрузка (преобразователь частоты), W – кабельная линия, S_1 , S_2 и S_3 – спокойные нагрузки.

Составим схему замещения исследуемой системы электроснабжения, необходимую для расчета цепи на высших гармонических составляющих (рис. 2).

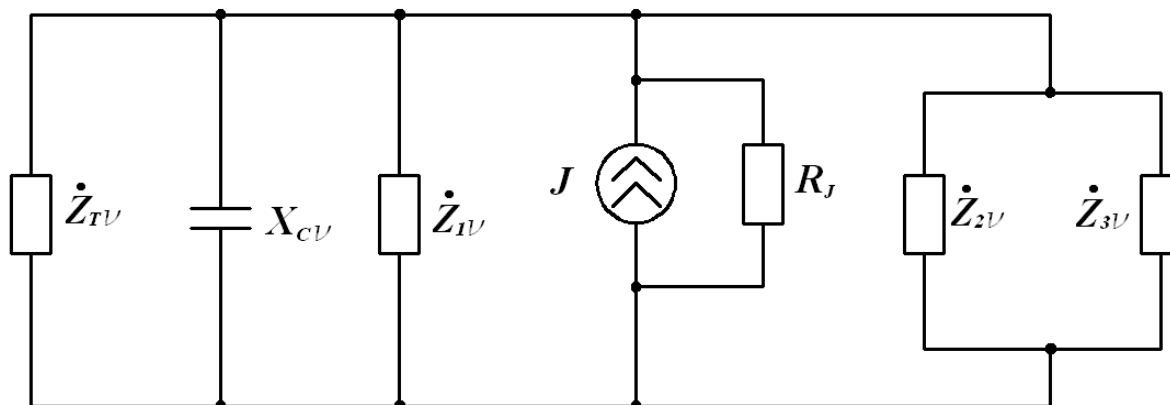


Рис.2. Схема замещения на высших гармониках:

Z - полные сопротивления спокойных нагрузок и трансформатора, приведенного к напряжению 0,4 кВ, нелинейная нагрузка представлена источником тока J и внутренним сопротивлением R_J , силовые конденсаторные батареи учитываются их реактивным сопротивлением X_C .

Схема замещения на рисунке 2 может быть посредством эквивалентных преобразований представлена как с источником тока (рис. 3а), так и эквивалентным источником ЭДС (рис. 3б), удобным для анализа режима резонанса токов

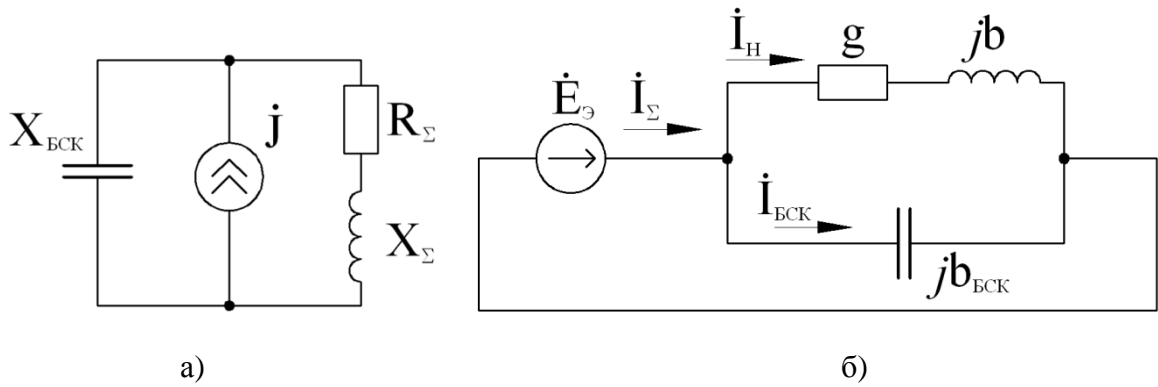


Рис.3. Преобразование схемы замещения.

Ток нагрузки I_n имеет активно-индуктивный характер и отстает от ЭДС E_Δ , может быть записан как:

$$\dot{I}_n = \dot{E}_\Delta \cdot \dot{Y} = \dot{E}_\Delta (q - jb) , \quad (1)$$

где \dot{E}_Δ – комплексное значение эквивалентной ЭДС, В

\dot{Y} – комплексная проводимость эквивалентной схемы замещения, См;

q – действительная часть комплексной проводимости \dot{Y} ;

jb_n – мнимая часть.

По определению комплексной проводимости имеем:

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{R_\Sigma + jX_\Sigma} = \frac{R_\Sigma - jX_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} - j \frac{X_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} = q - jb \quad (2)$$

$$q = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}; \quad jb_n = j \frac{X_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} \quad (3)$$

При положительном значении X , значение b положительно. Если X отрицательно, то b также отрицательно.

Ток в ветви БСК опережает ЭДС E_Δ . При $R_{\text{бск}} \rightarrow 0$, угол между током $I_{\text{БСК}}$ и ЭДС E_Δ будет стремиться к 90° .

$$\dot{I}_{\text{БСК}} = \dot{E}_\Delta \cdot \dot{Y}_{\text{БСК}} = \dot{E}_\Delta (q_{\text{БСК}} - jb_{\text{БСК}}) \quad (4)$$

Или при $R_{\text{бск}} \rightarrow 0$, т.е. $q_{\text{БСК}} \rightarrow \infty$, имеем $\dot{I}_{\text{БСК}} = -j \dot{U} b_{\text{БСК}}$

Ток в неразветвленной части цепи

$$\dot{I}_\Sigma = \dot{I}_t + \dot{I}_{\Delta\tilde{N}\tilde{E}} = \dot{E}_\Delta (q + q_{\Delta\tilde{N}\tilde{E}}) - j \dot{E}_\Delta (b + b_{\Delta\tilde{N}\tilde{E}}) \quad (5)$$

По определению резонансного режима ток \dot{I}_Σ должен совпадать по фазе с напряжением $\dot{U}_{сш}$. Это будет при условии, что сумма реактивных проводимостей ветвей равна нулю: $b_u + b_{БСК} = 0$

В соответствии с (5):

$$b = \frac{\omega L_\Sigma}{R_\Sigma^2 + \omega^2 L_\Sigma^2}; \quad b_{БСК} = -\frac{1}{R_{БСК}^2 + \frac{1}{\omega^2 C_{БСК}^2}}$$

Или при учете $R_{бск} \rightarrow 0$, получаем $b_{БСК} = \omega C_{БСК}$.

Таким образом, условие наступления режима резонанса токов в схеме рис.3 можно записать

$$\frac{\omega L_\Sigma}{R_\Sigma^2 + \omega^2 L_\Sigma^2} = \omega C_{БСК} \quad (6)$$

Векторная диаграмма резонанса токов при $R_{бск} \rightarrow 0$ представлена на рисунке 4.

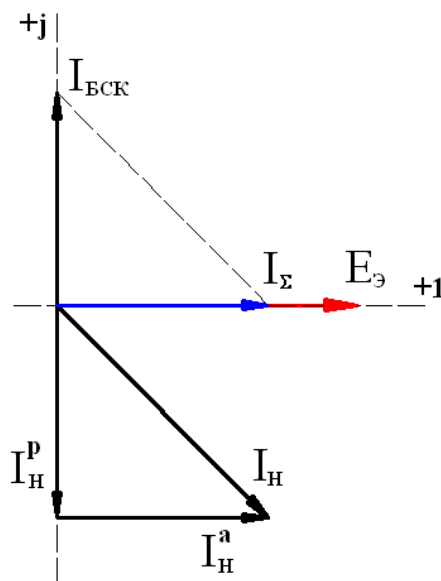


Рис. 4. Векторная диаграмма резонанса токов.

Если параметры X_H , $X_{бск}$ заданы и режим работы электроприемников, подключенных к шинам подстанции, не меняется, а также отсутствует регулирование компенсации реактивной мощности (ступенчатое переключение БСК), то резонансную частоту можно определить из формулы (6):

$$\omega_p = \sqrt{\frac{L_\Sigma - C_{БСК} R_\Sigma^2}{C_{БСК} L_\Sigma^2}} \quad (7)$$

Как было отмечено выше, при изменении мощности и характера электрических нагрузок и компенсации реактивной мощности регулируемые БСК уравнение (7) будет иметь три переменных параметра: L_{Σ} , $C_{БСК}$ и R_{Σ} .

Математическое моделирование и численные эксперименты

Для проведения численного эксперимента в соответствии с заданной схемой примем некоторые значения нелинейной нагрузки (введена внутренним сопротивлением источника тока R_j), общей нагрузки и трансформатора (табл. 1).

Таблица 1

Параметры схемы замещения

Общая нагрузка			Нелинейная нагрузка	Трансформатор			Кабельная линия	
S_1	S_2	S_3	UF	T			W	
кВА	кВА	кВА	R_j , Ом	S_t , кВА	$U_{кз}$, %	$P_{кз}$, кВт	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км
100+95j	20+15j	40+35j	2	400	4,5	5,5	0,869	0,0637

При расчетах учитывался характер изменения нагрузки, который фактически охватывал возможные комбинации сочетания одновременной работы нелинейной и общей нагрузки.

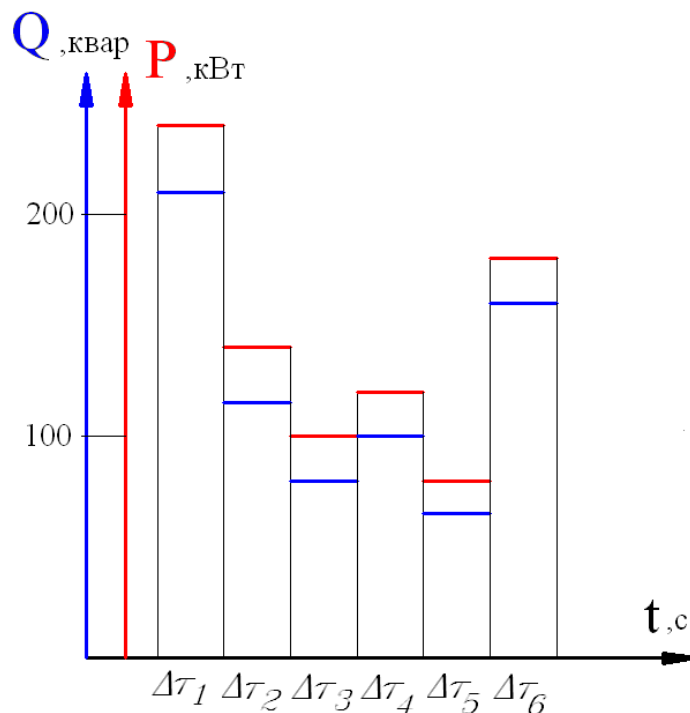


Рис. 5. График изменения нагрузок.

Интервалам времени соответствует комбинация одновременно работающих нагрузок (табл. 2).

Таблица 2

Комбинации нагрузок

Интервал времени	Нагрузки, работающие в интервале времени
$\Delta\tau_1$	S_1, S_2, S_3, UF
$\Delta\tau_2$	S_2, S_3, UF
$\Delta\tau_3$	S_2, UF
$\Delta\tau_4$	S_3, UF
$\Delta\tau_5$	UF
$\Delta\tau_6$	S_1, UF

Компенсация реактивной мощности осуществлялась до уровня $\text{tg}\varphi \leq 0.35$ [2], т.к. величина изменения уровня компенсации соответствовала шагу переключения БСК, равному 5000 вар.

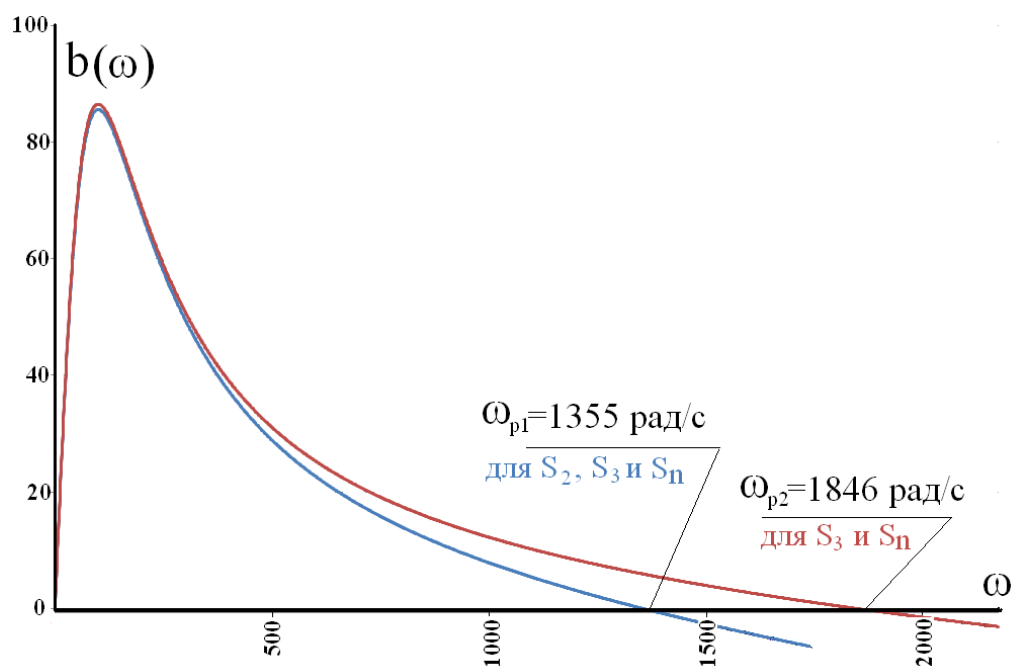


Рис. 6. АЧХ проводимости для двух интервалов времени: $\Delta\tau_2$ (синий) и $\Delta\tau_4$ (красный).

В результате численного моделирования переменной нагрузки получены значения резонансных частот для каждого интервала времени графика нагрузок (табл. 3).

Резонансные частоты для каждого участка графика электрических нагрузок

Интервал времени	Резонансная частота f_p , Гц
$\Delta\tau_1$	60,3
$\Delta\tau_2$	104,4
$\Delta\tau_3$	215,7
$\Delta\tau_4$	293,9
$\Delta\tau_5$	423,5
$\Delta\tau_6$	662,1

Выводы

Приведенные результаты численных экспериментов наглядно демонстрируют необходимость учета режима работы электроприёмников, активной проводимости схемы замещения и результатов применения регулирования ступеней БСК. Отсутствие учета данных факторов может привести к потере ряда частот, при которых наступает режим резонанса токов, а при наличии электроприёмников, являющихся источниками интергармоник, вообще к потере одного из резонансных режимов.

Как отмечалось в предыдущих работах [3], одним из инструментов при анализе режима резонанса токов может послужить вейвлет-анализ, позволяющий давать не только представление в частотном спектре, но и в амплитудно-временном виде. На рисунке 7 приведен пример разложения электроэнергетического сигнала при помощи вейвлет-анализа, где детализирующая составляющая сигнала показывает время изменения сигнала и гармонические составляющие в широком спектре сигналов.

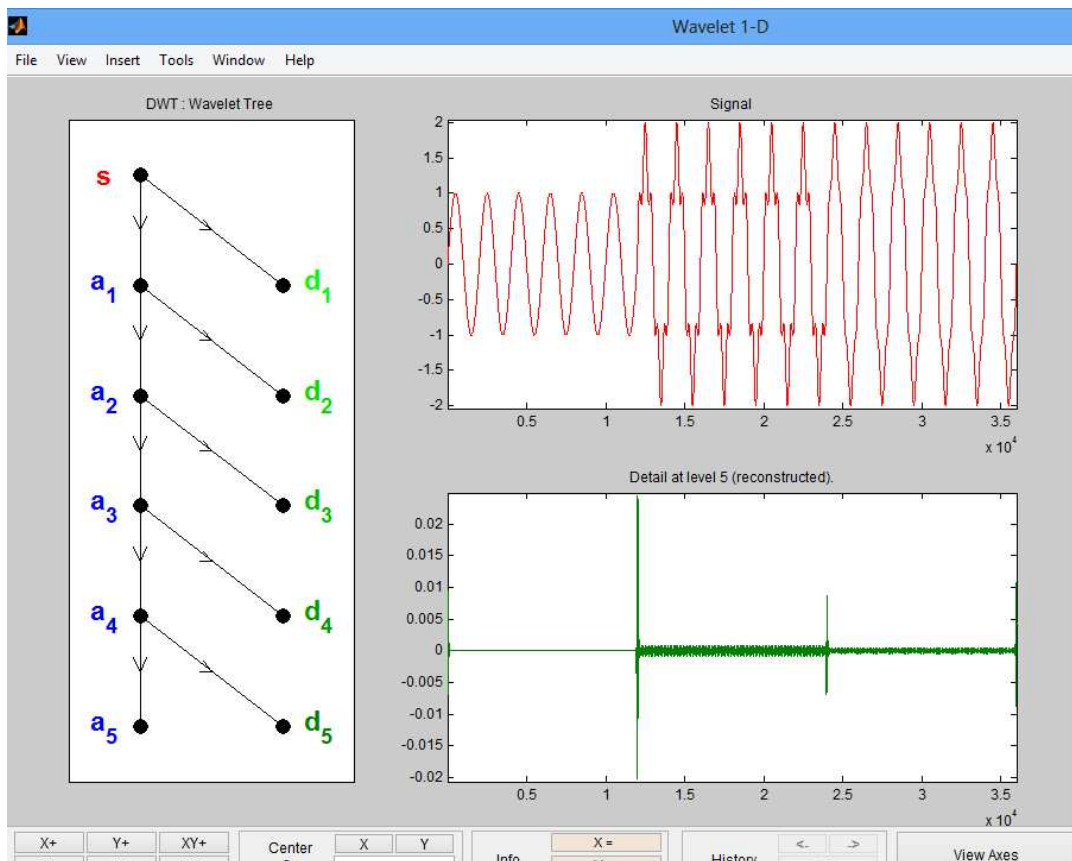


Рис. 7. Вейвлет-разложение сигнала.

Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения): Приказ Минпромэнерго РФ от 22.02.2007 N 49 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 22.03.2007 N 9134).
3. Сиромаха С.С. Вейвлет-анализ параметров качества электрической энергии как альтернатива преобразованию Фурье / С.С. Сиромаха, Д.С. Осипов, В.В. Харламов // Омский научный вестник. - 2011. - № 2(103). - С. 229-231.
4. P. Jintakosonwit, S. Srianthumrong Implementation and Performance of an Anti-Resonance Hybrid Delta-Connected Capacitor Bank for Power Factor Correction // IEEE Trans. Power Electron. -2007. - Vol. 22, no 6, Nov. - P. 2543-2551.

5. R. Inzunza and H. Akagi A 6.6-kv transformerless shunt hybrid active filter for installation on a power distribution system //IEEE Trans. PowerElectron. - 2005. - Vol. 20, no. 4. Jul. - P. 893–900.

Рецензенты:

Горелов В.П., д.т.н., профессор, заместитель зав. кафедрой «Электроэнергетические системы и электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирская государственная академия водного транспорта», г. Новосибирск;

Сальников В.Г., д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирская государственная академия водного транспорта», г. Новосибирск.