

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ**

*Аннотация.* Изучено влияние нагрузки на гармонический состав тока и напряжения в основной сети электроснабжения. Выявлены источники, которые вызывают искажение кривых тока и напряжения, и получены соответствующие гармонические спектры.

*Ключевые слова:* гармоника, нагрузка, трансформатор, сеть электроснабжения, MATLAB.

*Abstract.* The article deals with load influence on harmonious structure of current and voltage in the basic electrical network. The authors have discovered sources which cause distortion of curves of current and voltage, and obtained corresponding harmonious spectra.

*Key words:* harmonic, loading, transformer, electrical supply network, MATLAB.

### **Введение**

В связи с переходом работы организаций, занимающихся производством и распределением электрической энергии, на коммерческую основу актуальной становится проблема определения качества электрической энергии. Электрическая энергия, являющаяся товаром, имеет свои показатели качества.

Качество электрической энергии зависит не только от производителя, но и от параметров потребителей электрической энергии. Негативное влияние на качество электрической энергии оказывают потребители с нелинейной характеристикой. Именно нелинейность нагрузки приводит к возникновению гармонических искажений напряжения сети. Практически речь идет об искажении формы и, как следствие, гармонического состава напряжения не только на зажимах потребителя, но и всей сети электроснабжения.

### **1. Влияние нелинейной нагрузки на качество электрической энергии**

Исследуем влияние параметров нагрузки на такой параметр качества электрической энергии, как гармонический состав напряжения.

В большинстве случаев потребители электрической энергии имеют нелинейную вольт-амперную характеристику. Одними из таких потребителей являются мощные тяговые электровозы переменного тока. Рассмотрим их влияние на гармонический состав тока и напряжения сети электроснабжения.

Пусть сеть электроснабжения состоит из магистральной линии и трансформаторной подстанции (ТП), которая обеспечивает электрической энергией двух потребителей, получающих энергию по двум линиям (рис. 1). При этом один из потребителей (П1) является линейным и может быть представлен в схеме замещения в форме активного сопротивления и индуктивности. Этот потребитель получает питание по воздушной линии (ВЛ) большой протяженности ( $l = 100$  км). Вторым потребителем является выпрямительная

установка, питающая двигатель постоянного тока (П2), подключенная к той же подстанции.

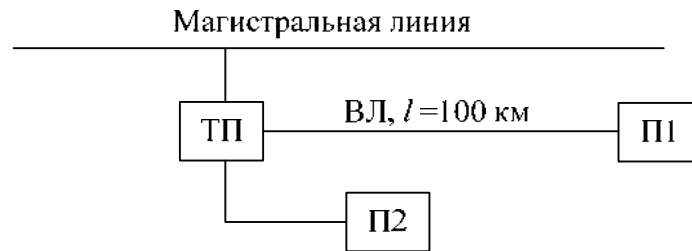


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения

В схеме замещения (рис. 2) магистральная линия представлена в качестве источника переменного напряжения ( $E$ ) с некоторым внутренним сопротивлением ( $L_B, R_B$ ). К источнику подключен силовой трансформатор ( $T1$ ) тяговой подстанции. Силовой трансформатор через контактную сеть ( $L_K, R_K$ ) питает трансформатор электровоза ( $T2$ ) переменного тока. Через трансформатор электровоза питается каскад выпрямителей ( $VD1-4$ ) и нагрузка в виде двигателя постоянного тока ( $M$ ). Также к источнику подключена линия с распределенными параметрами ( $R, L, G, B$ ), которая питает потребителя с линейной нагрузкой ( $L_H, R_H$ ).

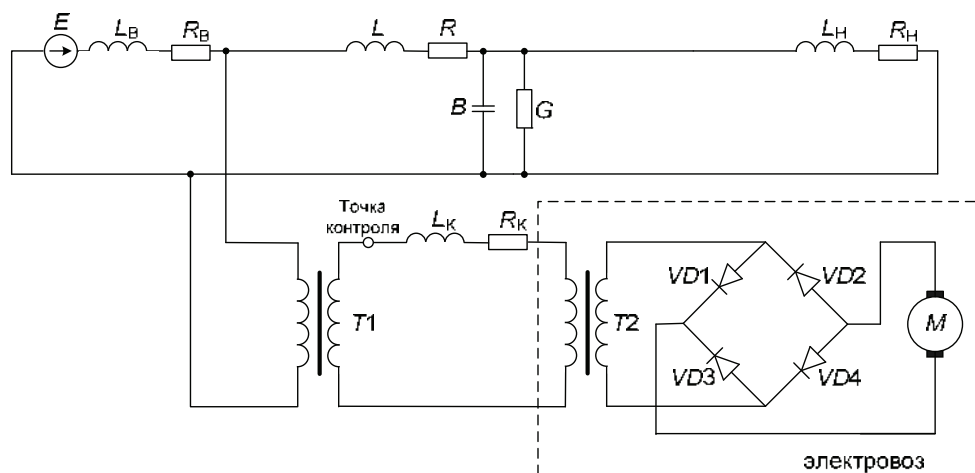


Рис. 2. Схема замещения системы электроснабжения

Для анализа процессов, происходящих в данной системе электроснабжения, в соответствии со схемой замещения, авторами разработана модель в среде MATLAB (рис. 3).

В модели  $E$  – источник напряжения;  $Z_B$  – внутреннее сопротивление источника;  $T_{П}$  – трансформатор тяговой подстанции переменного тока;  $T_1$  и  $T_2$  – силовые трансформаторы электровозов,двигающихся по разным путям двухпутного участка железной дороги;  $Z_{35}$  – сопротивление потребителя, подключенного на напряжение 35 кВ;  $Z_1$  и  $Z_2$  – сопротивления участков контактной сети от тяговой подстанции до электровозов,двигающихся соответственно по

первому и второму пути двухпутного участка;  $D1-D8$  – диоды мостовых схем электровозов переменного тока;  $K_1$  и  $K_2$  – ключи, определяющие моменты прохождения электровозов вблизи тяговой подстанции, соответственно для первого и второго путей двухпутного участка;  $RL$  – линия с распределенными параметрами;  $Z_H$  – сопротивление нагрузки, подключенной к длинной линии;  $M_1$  и  $M_2$  – первые двигатели постоянного тока каскадов двигателей электровозов (в модели по 8 двигателей для каждого электровоза).

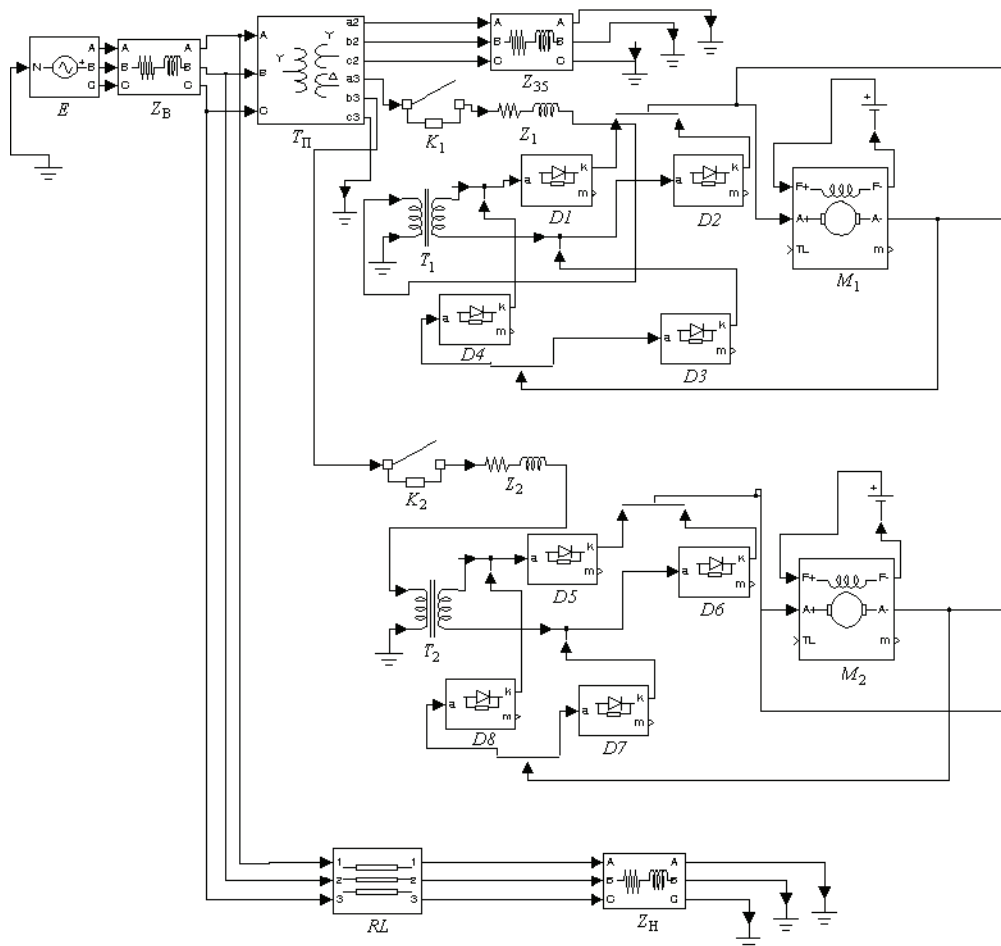


Рис. 3. Модель в среде MATLAB

Параметры элементов модели определены путем вычисления их по паспортным значениям параметров электроустановок, используемых в реальных системах электроснабжения [1]. Параметры сопротивлений  $Z_B$ ,  $Z_{35}$ ,  $Z_H$  определены исходя из режима ночных минимумов нагрузки, когда из-за снижения нагрузки увеличивается напряжение на ней.

Рассмотрим случай, когда интервал времени между моментами включения ключей  $K_1$  и  $K_2$  минимален. Таким образом, получаем наиболее тяжелый режим с точки зрения гармонических искажений. Спектральная характеристика напряжения, построенная по результатам моделирования для данного случая, представлена на рис. 4.

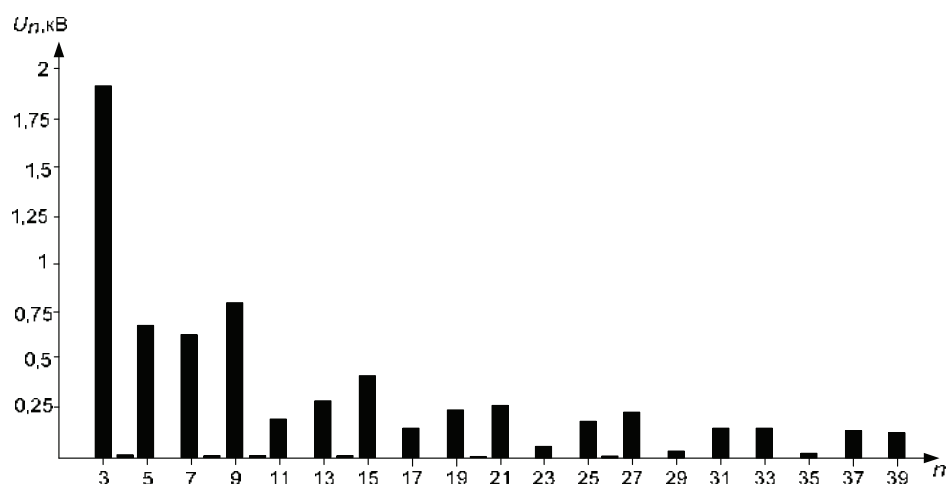


Рис. 4. Гармонический состав напряжения 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока по результатам моделирования

## 2. Измерение гармонического состава напряжения на тяге переменного тока в реальных условиях

Результаты исследований получены как моделированием, так и измерением показателей качества электрической энергии в реальных условиях.

Измерения проводились по методике в соответствии с ГОСТ Р 53333–2008. В качестве контрольной точки выбрана вторая обмотка напряжением 27,5 кВ силового трансформатора тяговой подстанции (рис. 2). Спектральная характеристика напряжения, построенная по результатам измерений, представлена на рис. 5.

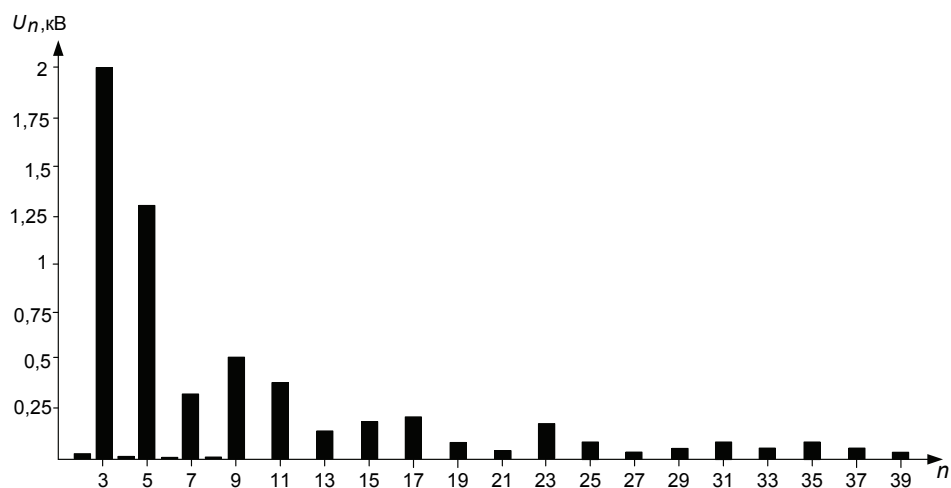


Рис. 5. Гармонический состав напряжения 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока по данным измерений

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, полученный по результатам измерений в реальных условиях, составляет 9,17 %. Тот же коэффициент, полученный путем моделирования системы, равен 9,08 %. Та-

ким образом, сравнение результатов измерений и моделирования показывает, что расхождение коэффициента искажения синусоидальности находится в пределах 10 %. Это доказывает то, что для анализа показателей качества электроэнергии в данном случае можно использовать математические модели.

Подтверждением негативного влияния тяговой подстанции на гармонический состав напряжения является корреляция часового графика активной мощности ( $P$ , кВт) и коэффициента искажения синусоидальности ( $K_U$ , %) (рис. 5), полученных по результатам реальных измерений.

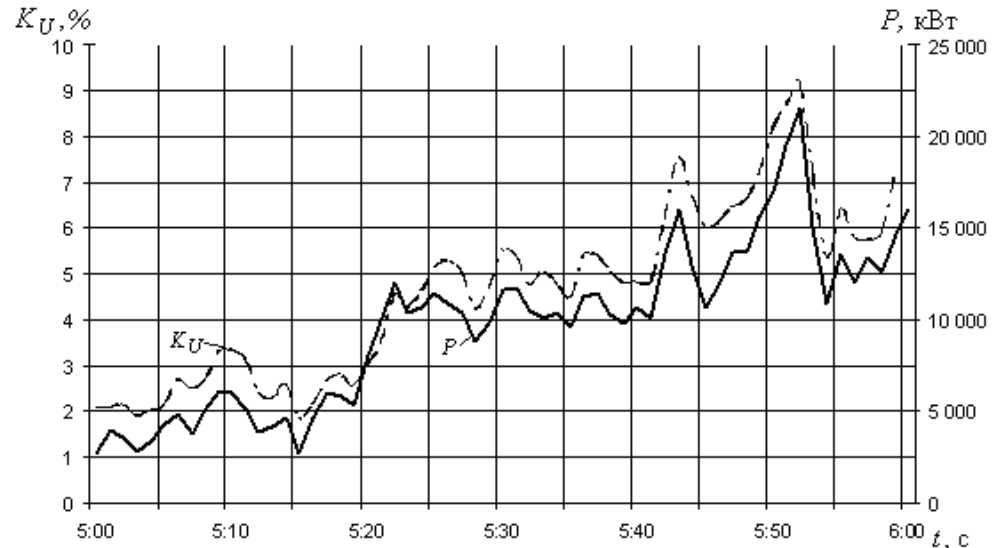


Рис. 6. Кривые мощности потребляемой нагрузки в точке контроля и коэффициента искажения синусоидальности напряжения для  $t = 1$  ч

Таким образом, нелинейная нагрузка является источником высших гармоник, величины которых могут значительно исказить форму кривой напряжения.

Проследим изменение гармонического состава напряжения от источника искажений к сети электроснабжения. Ток первичной обмотки трансформатора изменяется по несинусоидальному закону.

### 3. Математическое описание перехода гармонических искажений через силовой трансформатор

Математическое описание процесса появления гармоник в первичной обмотке трансформатора представлено ниже. Для начала представим ток  $i_2$  вторичной обмотки в виде суммы гармонических составляющих:

$$i_2 = \sum I_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k),$$

где  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  – номер гармонической составляющей;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота ( $f$  – частота переменного тока);  $\varphi_k$  – угол начального сдвига  $k$ -й гармонической составляющей.

Магнитный поток сердечника трансформатора будет определяться мгновенным значением тока и, таким образом, может рассматриваться в

форме суммы гармонических составляющих [2]. Тогда суммарный магнитный поток равен

$$\Phi = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k).$$

Суммарная величина противоЭДС первичной обмотки:

$$e'_1 = -w_1 \sum_k \frac{d\Phi_k}{dt} = -w_1 \sum_k k\omega \Phi_{mk} \cos(k\omega t + \varphi_k),$$

где  $w_1$  – число витков первичной обмотки трансформатора.

По второму закону Кирхгофа получим:

$$u'_1 = -e'_1 = w_1 \sum_k k\omega \Phi_{mk} \cos(k\omega t + \varphi_k).$$

Тогда ток в первичной обмотке, создаваемый высшими гармониками, будет равен

$$i_{1k} = w_1 \sum_k \frac{k\omega \Phi_{mk}}{k\omega L_1} \cos(k\omega t + \varphi_k - \pi/2) = \sum_k I_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k),$$

где  $L_1$  – индуктивность первичной обмотки трансформатора.

Таким образом, гармонические составляющие тока вторичной обмотки трансформатора искажают синусный закон изменения тока и напряжения первичной обмотки.

Трансформатор подключен к сети, которая может быть представлена в форме источника ЭДС с реальным внутренним сопротивлением, поэтому напряжение на выходе этого источника будет равно разности синусоидальной ЭДС и падения напряжения на внутреннем сопротивлении, равном произведению «несинусоидального» периодического тока на внутреннее сопротивление:

$$u_1 = e_1 - i_{1k} z_B,$$

где  $z_B$  – внутреннее сопротивление эквивалентного источника.

Таким образом, напряжение сети в точке подключения потребителя будет содержать гармонические составляющие.

#### **4. Влияние на гармонический состав потребителя, подключенного к длинной линии электропередачи**

Исследуем влияние потребителя с нелинейной нагрузкой (П2) на качество электрической энергии на зажимах потребителя с линейной нагрузкой (П1), подключенного к энергосистеме через длинную ВЛ.

Результатом моделирования в среде MATLAB стала осциллограмма напряжения на конце ВЛ и соответственно на зажимах потребителя с линейной нагрузкой (П1) (рис. 7).

Спектральная характеристика имеет всплеск на гармонике с порядковым номером 29. Это объясняется наличием эффекта резонанса на данной частоте в конце длинной линии [3].

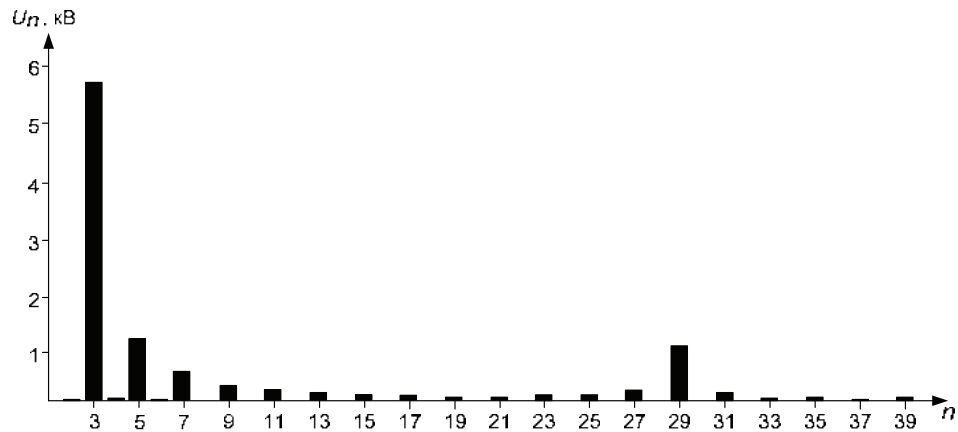


Рис. 7. Гармонический состав напряжения на конце длинной ВЛ 110 кВ

### Заключение

В энергосистемах, работающих на нагрузку с нелинейной характеристикой, возникают гармонические составляющие, превышающие нормативные значения по ГОСТ 13109–97 в несколько раз.

В статье на примере работы мощных электровозов железнодорожного транспорта, в которых для работы двигателей используется мостовая схема выпрямления, исследуется проблема низкого качества электрической энергии в других точках единой системы электроснабжения. Высокочастотные гармоники, возникающие в сети, распространяются по ней и могут вызывать аварийные перенапряжения.

Поэтому в электроэнергетических системах необходимо предусматривать устройство, способствующее снижению гармонических составляющих напряжения (тока).

### Список литературы

1. **Орлов, И. Н.** Электротехнический справочник : в 3 т. Т. 3 : в 2 кн. Кн. 2 / И. Н. Орлов и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 616 с.
2. **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.
3. **Кузьмин, Д. А.** Исследование влияния высокочастотных гармоник на уровень перенапряжения в высоковольтной линии электропередачи / Д. А. Кузьмин // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах : Международная научно-практическая конференция МК–1.40. – М., 2010. – С. 45–48.

**Кузьмин Дмитрий Алексеевич**  
аспирант, Пензенский  
государственный университет

E-mail: 2005dim@rambler.ru

**Kuzmin Dmitry Alekseevich**  
Postgraduate student,  
Penza State University

**Горячев Владимир Яковлевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
автоматизированных  
электроэнергетических систем,  
Пензенский государственный  
университет

E-mail: gorvlad1@yandex.ru

**Goryachev Vladimir Yakovlevich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of automated  
electropower systems, Penza  
State University

---

УДК 621.317.353.018.3

**Кузьмин, Д. А.**

**Исследование качества электрической энергии при наличии потребителей с нелинейными нагрузками / Д. А. Кузьмин, В. Я. Горячев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 148–155.**