

# КОРРЕКЦИЯ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ОДНОФАЗНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Моргунов Д.Н.<sup>1</sup>, Лабунский Л.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Моргунов Денис Николаевич – аспирант;

<sup>2</sup>Лабунский Леонид Сергеевич – доцент, кандидат технических наук,  
кафедра электроснабжения железнодорожного транспорта, факультет систем обеспечения движения поездов,  
Самарский государственный университет путей сообщения,  
г. Самара

**Аннотация:** важной задачей в области электроэнергетики является обеспечение электромагнитной совместимости потребителей в многофазных системах. Решением является устранение или снижение неуравновешенности их режима, возникшей в связи с широким применением нелинейных и несимметричных энергоемких нагрузок. Для уравнивания режимов электроснабжения с нелинейными несимметричными нагрузками необходимо применять корректирующие устройства. Рассмотрены математические выражения значений линейных токов и напряжений. Определены значения для нелинейного емкостного и индуктивного элемента. Рассмотрена структурная схема корректирующего устройства.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, системы электроснабжения, корректирующие устройства, нелинейная нагрузка, ряд Фурье, индуктивность, емкость, аналогов реактивных элементов.

УДК 621.311.6

Для уравнивания режимов с нелинейными несимметричными нагрузками необходимо применять корректирующие устройства, выполненные на базе нескольких конденсаторов и реакторов с нелинейными характеристиками.....

В настоящее время одной из важных задач в области электроэнергетики является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) потребителей в многофазных системах, что предполагает устранение или снижение неуравновешенности их режима, возникшей в связи с широким применением нелинейных и несимметричных энергоемких нагрузок. К ним относятся, в основном, электротехнологические и преобразовательные установки (дуговые сталеплавильные печи, установки электрошлакового переплава и скоростного электроконтактного нагрева, индукционные печи, сварочные агрегаты, полупроводниковые преобразователи и др.), подключение которых к электрической сети приводит к значительному экономическому и технологическому ущербу из-за ухудшения качества электроэнергии и увеличения ее потерь [1].

Существующие методы и технические средства уравнивания режимов систем электроснабжения (СЭС) достаточно эффективны для применения лишь в СЭС с линейными стационарными несимметричными элементами. Следовательно, для уравнивания режимов СЭС с нелинейными несимметричными нагрузками необходимо применять корректирующие устройства (КУ), выполненные на базе нескольких конденсаторов и реакторов с нелинейными характеристиками. Однако практическая реализация таких нелинейных реактивных элементов представляет собой отдельную научно-техническую проблему, поскольку их нелинейность описывается достаточно сложными аналитическими зависимостями.

Поэтому для решения поставленной задачи необходимо разработать такой метод синтеза цепей уравнивания режима трехфазной системы с нелинейными несимметричными нагрузками, которые позволяют минимизировать количество нелинейных реактивных элементов в схеме КУ вплоть до применения одного из них. Данную задачу удалось решить, используя метод гармонического баланса и определенный подход, заключающийся в компенсации нелинейности однофазной нагрузки  $Z_H(t)$  путем подключения параллельно ей компенсирующего нелинейного элемента  $Z_K(t)$ . [3] В качестве допущений принимаем, что характеристика компенсирующего нелинейного элемента  $C_K(t)$  или  $L_K(t)$  имеет заданное аналитическое представление в виде полиномов или тригонометрических рядов, а мощность источника питания бесконечна. Рассмотрим основные положения такого подхода к решению поставленной задачи более подробно.

Как известно, при подключении к трехфазной цепи симметричных элементов имеет место уравновешенный режим ее работы, характеризующийся ее постоянством во времени  $t$  мгновенной мощности  $p(t)$ . В этом случае выражения для мгновенных значений линейных напряжений цепи имеют вид:

$$\begin{aligned}
u_{AB}(t) &= U_m \sqrt{3} \sin(\omega t + \pi / 6); \\
u_{BC}(t) &= -U_m \sqrt{3} \cos \omega t; \\
u_{CA}(t) &= -U_m \sqrt{3} \sin(\omega t - \pi / 6),
\end{aligned} \tag{1}$$

Где  $U_m$  - амплитудное значение фазных напряжений трехфазной цепи;  $\omega$  - угловая частота. Предположим, что однофазная нелинейная нагрузка  $Z_H(t)$ , подключенная на линейное напряжение  $u_{BC}(t)$  электрической сети, характеризуется током:

$$i_H(t) = A_{H1} \cos \omega t + B_{H1} \sin \omega t + \sum_{s=2}^n (A_{Hs} \cos s\omega t + B_{Hs} \sin s\omega t), \tag{2}$$

Где  $A_{H1}$  и  $B_{H1}$  - коэффициенты тригонометрического ряда Фурье.

На практике при известной оценке частоты  $\hat{\omega}$  оценки синусных и косинусных составляющих тока могут быть получены на основе рекуррентного метода наименьших квадратов.

Способ компенсации нелинейности  $Z_H(t)$  заключается в создании компенсирующего тока  $i_k(t)$ , который в сумме с током  $i_H(t)$  нагрузки дает синусоидальную функцию [4]. Как следует из выражения (2), тривиальным решением в этом случае является формирование тока

$$i_k(t) = A_{K1} \cos \omega t + B_{K1} \sin \omega t - \sum_{s=2}^n (A_{Hs} \cos s\omega t + B_{Hs} \sin s\omega t), \tag{3}$$

В результате чего суммарный ток представляется следующем выражением:

$$i_{BC}(t) = i_H(t) + i_k(t) = (A_{H1} + A_{K1}) \cos \omega t + (B_{H1} + B_{K1}) \sin \omega t.$$

При подключении параллельно нелинейной нагрузки  $Z_H(t)$  конденсатора с переменной емкостью  $C_k(t)$  его заряд  $q_k(t) = C_k(t)u_{BC}(t)$ , откуда  $C_k(t) = q_k(t) / u_{BC}(t)$ .

Из выражения (3) очевидно, что

$$q_k(t) = \frac{1}{\omega} [A_{K1} \sin \omega t - B_{K1} \cos \omega t - \sum_{s=2}^n \frac{1}{s} (A_{Hs} \sin s\omega t - B_{Hs} \cos s\omega t)]$$

Следовательно,

$$C_k(t) = \frac{A_{K1} \sin \omega t - B_{K1} \cos \omega t - \sum_{s=2}^n \frac{1}{s} (A_{Hs} \sin s\omega t - B_{Hs} \cos s\omega t)}{\omega U_m \sqrt{3} \cos \omega t} \tag{4}$$

Допустим, что параллельно нагрузке  $Z_H(t)$  подключен реактор с индуктивностью  $L_K(t)$ . Тогда

$$\frac{d}{dt} [L_K(t) i_k(t)] = -U_m \sqrt{3} \cos \omega t;$$

$$L_K(t) i_k(t) = -\frac{U_m \sqrt{3} \sin \omega t}{\omega}$$

Из последнего отношения имеем

$$L_K(t) = -\frac{U_m \sqrt{3} \sin \omega t}{\omega i_k(t)}$$

Откуда с учетом (3) получим:

$$L_K(t) = -\frac{U_m \sqrt{3} \sin \omega t}{\omega [A_{K1} \cos \omega t + B_{K1} \sin \omega t - \sum_{s=2}^n (A_{Hs} \cos s\omega t + B_{Hs} \sin s\omega t)]} \tag{5}$$

Для нелинейного емкостного элемента, подключенного параллельно нагрузке  $Z_H(t)$ , с учетом того, что  $wt = \pi - \arccos(u_{BC} / U_m \sqrt{3})$ , справедливо:

$$q_K = \frac{1}{w} \left\{ A_{K1} \sin\left(\pi - \arccos\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right)\right) - B_{K1} x \cos\left(\pi - \arccos\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right)\right) - \sum_{s=2}^n \frac{1}{s} \left[ A_{Hs} \sin sw\left(\pi - \arccos\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right)\right) - B_{Hs} \cos sw\left(\pi - \arccos\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right)\right) \right] \right\}$$

Или

$$q_K(u_{BC}) = \frac{1}{w} \left\{ A_{K1} U_1\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right) + B_{K1} T_1\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right) + \sum_{s=2}^{\infty} \frac{\cos \pi s}{s} \left[ A_{Hs} U_s\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right) + B_{Hs} T_s\left(\frac{u_{BC}}{U_m \sqrt{3}}\right) \right] \right\}, \quad (6)$$

Где  $T$  и  $U$  – полиномы Чебышева первого и второго рода.

Аналогичным образом определяем ток  $i_K(\psi)$  для нелинейного индуктивного элемента: (7)

$$i_K(\psi) = A_{K1} U_1\left(\frac{\psi w}{U_m \sqrt{3}}\right) - B_{K1} T_1\left(\frac{\psi w}{U_m \sqrt{3}}\right) - \sum_{s=2}^{\infty} T_s x \left(\frac{\psi w}{U_m \sqrt{3}}\right) \left[ A_{Hs} \cos\left(s \frac{\pi}{2}\right) - B_{Hs} \sin\left(s \frac{\pi}{2}\right) \right] + \sum_{s=2}^{\infty} x U_s \left(\frac{\psi w}{U_m \sqrt{3}}\right) \left[ A_{Hs} \sin\left(s \frac{\pi}{2}\right) + B_{Hs} \cos\left(s \frac{\pi}{2}\right) \right],$$

Где  $\psi = U_m \sqrt{3} \sin wt / w$

Отметим, что формулы (4)-(7) являются общими характеристиками компенсирующих нелинейных элементов  $Z_K(t)$ . Следовательно, рассмотренный метод компенсации нелинейностей в узле нагрузки дает возможность синтезировать цепи уравнивания КУ с одним физически реализуемым компенсирующим нелинейным реактивным элементом при произвольном задании характеристик нагрузки.

Эффективность разработанного метода синтеза определяет технической реализацией ключевых аналогов реактивных элементов (АРЭ) и аналогоцифровых систем управления таких КУ. Известны различные пути схемной реализации быстродействующих АРЭ, причем их динамические характеристики зависят от времени выключения тиристоров или силовых транзисторов, а также от структуры, элементной базы (микропроцессоров, прецизионных компараторов, интегральных ключей, высокоточных перемножающих АЦП и др.) и алгоритмов функционирования системы управления.[2] Отметим, что современный уровень развития силовой преобразовательной техники и микропроцессорных средств позволяет уже в настоящее время создавать эффективные КУ для уравнивания режимов трехфазных систем с нелинейными несимметричными элементами.

На рис. 1 приведена одна из структурных схем такого КУ, принцип работы которого заключается в следующем. Ток  $i_H(t)$  нелинейной нагрузки преобразуется в пропорциональное ему напряжение с помощью измерительного преобразователя тока (ПТ). Измеритель коэффициентов Фурье (ИКФ) определяет коэффициенты  $A_{iH}$  и  $B_{iH}$  разложения в ряд Фурье тока  $i_H(t)$ . Эти величины через устройство сопряжения (УС) поступают в состоящий из БИС микропроцессорного набора вычислительно-управляющий блок (ВУБ), который осуществляет вычисления и вырабатывает управляющие воздействия для двух линейных и одного нелинейного реактивных элементов. Для управления тиристорами силовых схем, реализующих эти элементы, предназначен многоканальный программно-управляемый формирователь импульсов (ФИ), а системы управления СУ1-СУ3 осуществляют включение

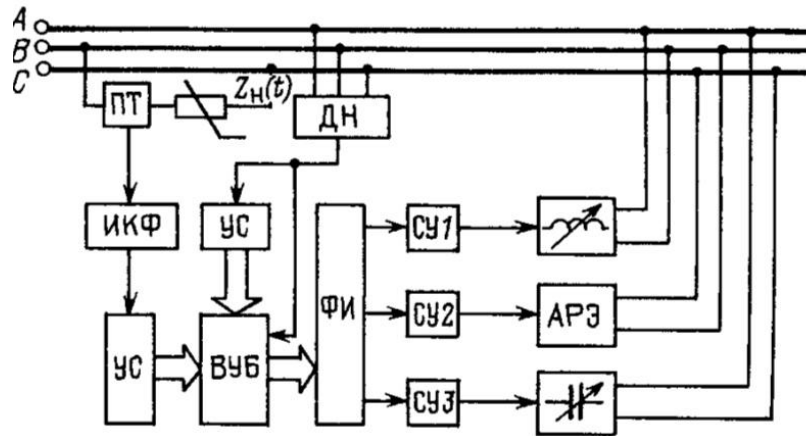


Рис. 1. Структурная схема корректирующего устройства

И отключение тиристоров. Датчик напряжения (ДН) служит для синхронизации работы ВУБ с сетью, а совместно с УС - для определения величины  $U_0$ .

#### Список литературы

1. Кабышев А.В. Томск: Издательство Томского политехнического университета «Электроснабжение объектов. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования», 2007. 185 с.
2. Новожилов О.П. Москва: Издательство Юрайт. «Электротехника и электроника», 2016. 653 с.
3. [Электронный ресурс]: Тэнси Плюс. Режим доступа: <http://www.tensy.ru/> (дата обращения 18.12.18).
4. [Электронный ресурс]: StudFiles. Режим доступа: <https://studfiles.net/> (дата обращения 18.12.18).]