УДК 621.316.94

# ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

**АНХЕЛЬ ОСКАР КОЛУМБИЯ НАВАРРО,** *профессор, ректор, anhel@ismm.edu.cu*
*Высший горно-металлургический институт, Моа, Республика Куба*
**Я.Э.ШКЛЯРСКИЙ,** *д-р техн. наук, профессор, js-10@mail.ru*
**А.Н.СКАМЬИН,** *канд. техн. наук, ассистент, askamin@yandex.ru*
*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия*

Рассматриваются вопросы эквивалентирования сложных электрических сетей промышленных предприятий. Сравниваются различные методы усреднения совокупности эквивалентируемых элементов системы электроснабжения: моментов, эквивалентного сечения, среднего значения параметра. Основным критерием при определении погрешности эквивалентирования электрической схемы является значение тока конденсаторной батареи в составе электротехнического комплекса предприятия. Рассматриваются вопросы эквивалентирования с помощью указанных методов при наличии высших гармоник в электрической сети предприятия. Сравнение методов эквивалентирования электрической сети при наличии высших гармоник показывает, что погрешность при расчете тока конденсаторной батареи меняется от 3,8 до 14,7 %, при этом наиболее точный метод эквивалентирования при определении перегрузки конденсаторной батареи – метод моментов.

***Ключевые слова*:** высшие гармоники, эквивалентирование, перегрузка, конденсаторные батареи, компенсация, электрическая сеть, электрическая нагрузка.

Понятие «эквивалентирование» используется достаточно часто в процессе проектирования электрических комплексов и изучения реальных процессов работы электрических сетей. Применение понятия эквивалентирования обусловлено необходимостью упрощения математических расчетов, которые, несмотря на широчайшие возможности вычислительной техники, могут вызывать множество проблем. Эти проблемы связаны как с ограничением числа узлов при расчете схем электроснабжения, так и с проблемой сходимости расчетов.

Таким образом, рассмотрение вопросов эквивалентирования электрических сетей актуально и сегодня, особенно в условиях интенсивного внедрения современных частотно-регулируемых приводов, работа которых приводит к появлению гармонических искажений в напряжении и токе [5, 6, 7].

К эквивалентированию электрических сетей можно подходить с разных точек зрения, которые лежат в основе различных методов. Однако во всех методах присутствует одна общая черта, а именно – усреднение совокупности эквивалентируемых элементов системы. Операция усреднения может носить обобщенный или частичный характер.

Вопросам эквивалентирования схем электроснабжения посвящено достаточно много работ, однако, наличие явно выраженных высших гармоник требует нового подхода к эквивалентированию схем электроснабжения [1, 4, 6, 7]. Это вызвано прежде всего требова-

нием более точного по сравнению с существующими методами определения тока конденсаторной батареи (КБ), как наиболее уязвимого элемента электротехнического комплекса промышленных предприятий [2, 3].

Эквивалентирование электрической сети содержит следующие этапы:

• сбор первичной информации об эквивалентируемой системе, включающей структуру схемы электроснабжения, данные о параметрах сети, нагрузки и ступенях напряжения;

• на основе обработки данных, полученных на первом этапе, приведение схемы к виду с существенно меньшим числом элементов;

• определение наиболее рационального метода эквивалентирования, приводящего к наиболее точному решению поставленной задачи с применением схем замещения элементов, адекватно отображающих воздействие высших гармоник.

Сравним различные методы эквивалентирования сети без учета высших гармоник. За базисную схему замещения электрической сети возьмем рисунок, где количество ветвей $m$ и ветвей $n$ изменялось от 1 до 40.

На схеме замещения: $U_0$ – фазное напряжение источника рассматриваемой сети; $P_{im}$, $Q_{im}$ – соответственно активная и реактивная мощности $m$-й линии напряжением 6кВ; $P_{in}$, $Q_{in}$ – активная и реактивная мощности $n$-й линии низковольтного напряжения; $R_{im}^{(1)}$, $X_{im}^{(1)}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление $m$-й линии; $R_{in}^{(1)}$, $X_{in}^{(1)}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление $n$-й линии; $X_C^{(1)}$ – сопротивление системы; $R_{\text{Тр}in}^{(1)}$ и $X_{\text{Тр}in}^{(1)}$ – активное и реактивное сопротивление трансформатора; $X_{\text{КБ}}^{(1)}$ – реактивное сопротивление КБ. Все параметры приведены для первой основной гармоники.

Рассмотрим метод эквивалентирования, называемый *методом моментов*, который широко применяется при расчетах электрических цепей, представляющих собой схему замещения принципиальной схемы электроснабжения предприятия. Мощность нагрузки, как активной, так и реактивной, определяется суммированием их отдельных значений:

$$P_{\text{Э}m} = \sum_{m=1}^{M} P_{im};\ P_{\text{Э}n} = \sum_{m=1}^{M} P_{in};\ Q_{\text{Э}m} = \sum_{m=1}^{M} Q_{im};\ Q_{\text{Э}n} = \sum_{m=1}^{M} Q_{in}\ . \qquad (1)$$

Параметры эквивалентной сети на первой гармонике определяются по выражениям:

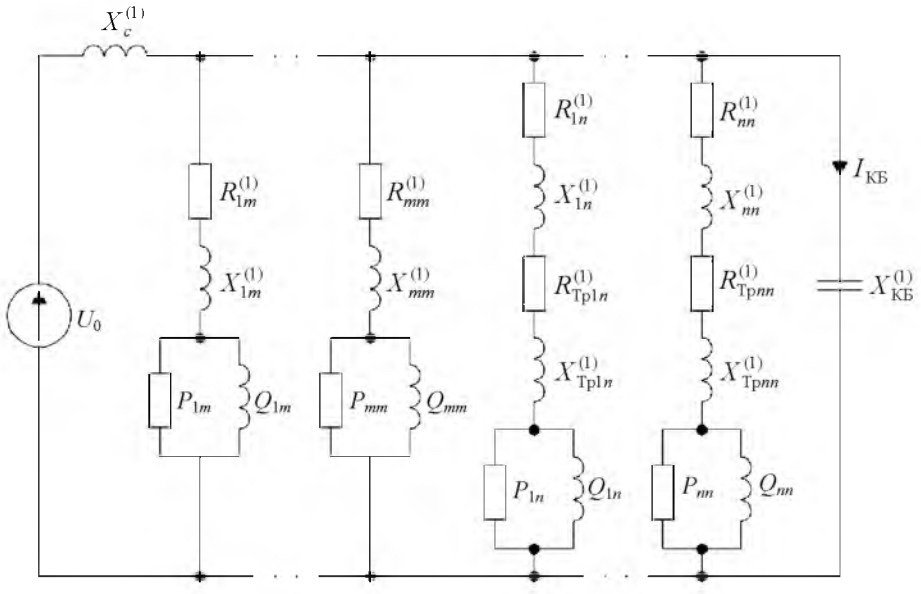



Схема замещения электрической сети

$$R_{Эm}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i R_i^{(1)}}{\sum_{i=1}^{N} S_i};\ X_{Эm}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i X_i^{(1)}}{\sum_{i=1}^{N} S_i}, \quad (2)$$

где $R_{Эm}^{(1)}, X_{Эm}^{(1)}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление линии на первой гармонике; $S_{im} = \sqrt{P_{im}^2 + Q_{im}^2}$ – полная мощность *i*-го присоединения, для низковольтной линии ее параметры определяются аналогично и имеют индекс *n*.

Главным допущением в данном методе является неучет статических характеристик нагрузки. В результате расчета параметров схемы замещения электрической сети на рисунке, приведенной к среднему напряжению 6 кВ, содержащей *m* ветвей среднего напряжения и *n* ветвей низкого напряжения, было проведено сравнение токов КБ с результатами расчета тех же параметров эквивалентной схемы. Количество ветвей *m* и ветвей *n* изменялось в следующих пределах: *m* = l-40; *n* = 1-40, что соответствовало стабилизации погрешности расчета тока КБ при увеличении *m* и *n*.

В результате расчетов максимальная погрешность эквивалентирования электрической сети по методу моментов при определении тока конденсаторной батареи может составить 3,4 %.

Далее рассмотрим *метод эквивалентного сечения*. Это математически обоснованный подход к эквивалентированию сечения линий передачи, но обладающий значительными недостатками.

Основным допущением, как и в методе моментов, является неучет статических характеристик нагрузки. Кроме этого, параметры схемы замещения эквивалентного трансформатора предлагается определить по его номинальной мощности

$$S_{ЭТр} = \sum_{n=1}^{N} S_{i\text{Тр}}, \quad (3)$$

где $S_{i\text{Тр}}$ – номинальная мощность *i*-го трансформатора; *N* – общее количество трансформаторов.

В основу выбора эквивалентных параметров линии передачи положен принцип определения сечения по нагрузке.

Аналогично предыдущему методу были произведены расчеты для эквивалентной схемы замещения, сформированной по методу эквивалентного сечения с дальнейшим сравнением результатов с исходной непреобразованной схемой. На основе анализа полученных расчетных результатов можно утверждать, что максимальная погрешность в этом случае составит 13 %.

Рассмотрим *метод среднего значения параметра*. В его основе лежит принцип расчета среднего значения параметров эквивалентируемых сопротивлений кабельных линий и трансформаторов. Допущения в методе среднего значения параметров аналогичны допущениям в предыдущих методах.

Значения параметров определяются по следующим выражениям:

$$R_{Эm}^{(1)} = \frac{\sum_{m=1}^{M} R_{im}^{(1)}}{M};\ X_{Эm}^{(1)} = \frac{\sum_{m=1}^{M} X_{im}^{(1)}}{M};\ R_{Эn}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^{N} R_{in}^{(1)}}{N};$$

$$X_{Эn}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^{N} X_{in}^{(1)}}{N};\ R_{\text{Тр}n}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^{N} R_{\text{Тр}in}^{(1)}}{N};\ X_{\text{Тр}n}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^{N} X_{\text{Тр}in}^{(1)}}{N}. \quad (4)$$

В результате расчетов погрешность по методу среднего значения параметров составила 6,1 %.

Полученные результаты справедливы для схемы замещения, сформированной для воздействия только первой, основной гармоники. Оценим влияние высших гармоник в электрической сети на параметры элементов системы электроснабжения, включая асинхронную нагрузку, и на погрешность в зависимости от метода эквивалентирования.

Величина тока через КБ с учетом высших гармоник (ВГ) определяется выражением:

$$I_{\text{КБ}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{K} I_{\text{КБ}}^{(K)^2}}. \qquad (5)$$

Оценим погрешность, вносимую методом эквивалентирования, при расчете тока КБ при наличии ВГ. Поскольку ток на КБ определяется методом наложения, для каждого метода в отдельности погрешность с учетом высших гармоник будет рассчитываться по выражению

$$\delta I_{\text{КБ}} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(I_{\text{КБ}j} - I_{\text{КБ}})^2}}{I_{\text{КБ}}};\ I_{\text{КБ}j} = I_{\text{КБ}}(I_{\text{КБ}i}(I_{\text{КБ}k} + \Delta I_{\text{КБ}k}))\Big|_{k \neq i}^{i = 1-n};\ I_{\text{КБ}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} I_{\text{КБ}i}^2}. \qquad (6)$$

Определенная по выражению (6) погрешность с учетом высших гармоник до 40-го порядка (что превышает необходимые по ГОСТу 25 гармоник) и, учитывая спектр гармоник: по методу моментов – 3,8; по методу эквивалентного сечения – 14,7; по методу среднего значения параметров – 6,5.

Сравнение полученных результатов позволяет заключить, что при использовании метода моментов для эквивалентирования электрической сети промышленного предприятия с радиальной схемой электроснабжения с целью расчета токов КБ при наличии ВГ можно уменьшить погрешность расчета на 3,8 %.

Установлено, что с учетом только первой гармоники наименьшей погрешностью определения токов КБ обладает метод моментов (3,4 %). Метод эквивалентного сечения вносит погрешность 13 %, метод среднего значения параметров – 6,1 %.

Сравнение полученных данных тока КБ позволило разработать наиболее эффективный метод, основанный на методе моментов. Максимальная погрешность определения тока КБ для характерных параметров элементов электротехнического комплекса промышленных предприятий при наличии высших гармоник составила 3,8 %.

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Коровченко П.В.* Эквивалентирование нагрузки в зависимости от спектра высших гармоник / П.В.Коровченко, А.Н.Скамьин // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 2. С.56-59.

2. *Скамьин А.Н.* Повышение эффективности функционирования конденсаторных батарей в электрической сети горного предприятия // Записки Горного института. 2011. Том 189. С.107-110.

3. *Шклярский Я.Э.* Снижение уровня высших гармоник в сетях промышленного предприятия / Я.Э.Шклярский, А.Н.Скамьин // Промышленная энергетика. 2012. № 8. С.44-47.

4. *Andersson G.* Modeling and Analysis of Electric Power Systems / EEH – Power Systems Laboratory. ETH Zurich. September 2008, 183 p.

5. *Mahanty R., Kapoor A.K.* Quasi-passive filter for harmonic filtering. Electric Power Systems Research (78). 2008, p.1456-1465.

6. *Rios S., Naranjo A., Escobar A.* Modeling of electrical systems in the presence of harmonics. IEEE Transactions on Power Systems (IX, 22). 2003, p.987-993.

7. *Saša Vlahinić, Dalibor Brnobić, Dubravko Vučetić.* Measurement and analysis of harmonic distortion in power distribution systems. Electric Power Systems Research. Vol.79, Issue 7. 2009, p.1121-1126.

## REFERENCES

1. *Korovchenko P.V., Skamyin A.N.* Jekvivalentirovanie nagruzki v zavisimosti ot spektra vysshih garmonik (*Load equivalenting depending on the spectrum of high harmonics*). Al'ternativnaja jenergetika i jekologija, 2014. N 1, p.56-59.

2. *Skamyin A.N.* Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija kondensatornyh batarej v jelektricheskoj seti gornogo predprijatija (*Increasing the condenser battery efficiency in the electric network of mining enterprises*). Zapiski Gornogo instituta. 2011. Vol.189, p.107-110.

3. *Shkljarskij Ja.E., Skamyin A.N.* Snizhenie urovnja vysshih garmonik v setjah promyshlennogo predprijatija (*High harmonic reduction in electric networks of industrial enterprises*). Promyshlennaja jenergetika. 2012. N 8, p.44-47.

4. *Andersson G.* Modeling and Analysis of Electric Power Systems / EEH – Power Systems Laboratory. ETH Zurich. September 2008, p.183.

5. *Mahanty R., Kapoor A.K.* Quasi-passive filter for harmonic filtering. Electric Power Systems Research (78). 2008, p.1456-1465.

6. *Rios S., Naranjo A., Escobar A.* Modeling of electrical systems in the presence of harmonics. IEEE Transactions on Power Systems (IX, 22). 2003, p.987-993.

7. *Saša Vlahinić, Dalibor Brnobić, Dubravko Vučetić.* Measurement and analysis of harmonic distortion in power distribution systems. Electric Power Systems Research. Vol.79. Issue 7. 2009, p.1121-1126.


## ELECTRIC NETWORK EQUIVALENTING IN THE PRESENCE OF HIGH HARMONICS


**ANGEL OSCAR COLUMBIE NAVARRO**, *Professor, Rector, anhel@ismm.edu.cu*
*Higher Institute of Mining and Metallurgy, Moa, Holguin, Cuba*
**YA.E.SHKLYARSKIY,** *Dr. of Engineering Sciences, Professor, js-10@mail.ru*
**A.N.SKAMYIN**, *PhD in Engineering Sciences, Assistant Lecturer, askamin@yandex.ru*
*National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia*



The article deals with equivalenting of complex electrical networks of industrial enterprises. In the article the different methods of averaging equivalenting elements in power systems are compared, specifically, the method of moments, the equivalent section method, and the average value method. The current value of the capacitor bank as part of the electrotechnical complex of the enterprise is the main criterion for determining the equivalenting error of the electric network. The equivalenting in the presence of high harmonics in electrical networks of the enterprise is considered by applying the methods under discussion. Comparison of these equivalenting methods in the presence of high harmonics shows that the error in the calculation of capacitor bank current ranges from 3,8 to 14,7 %. In addition, the most accurate method for determining the capacitor bank overload is the method of moments.



***Key words*:** high harmonics, equivalenting, overload, capacitor bank, compensation, electric network, electric load.