

## ОТДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКАЧЕСТВЕННОСТИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ

**Введение.** Проблемы определения взаимного влияния нелинейных потребителей и питающей сети и разделения их долевых вкладов в ухудшение показателей качества электроэнергии в точке подключения потребителя беспокоят специалистов как электроснабжающего профиля, так и специалистов, работающих в области идентификации, диагностики и мониторинга параметров потребителей, существенную часть которых составляют электроприводы электромеханических систем. В настоящий момент наиболее перспективными методами исследований состояния электромеханических систем являются методы, базирующиеся на основе анализа мгновенных значений тока, напряжения и мощности, а также их гармонических составляющих [1,2]. Эффективная реализация таких подходов будет осуществлена только тогда, когда вся необходимая информация для анализа будет получаться без применения специальных силовых устройств, изменяющих параметры и режим работы питающей сети или потребителя. Отказ от последнего позволит широко внедрить практику экспресс-диагностики и текущего мониторинга электрооборудования как в стационарных, так и в полевых компьютеризированных комплексах в условиях работы неидеальных электрических сетей напряжением, в основном, до 1000 В. При этом, указанные мероприятия имеют целью не финансовые разбирательства по поводу долевого ухудшения показателей качества электроэнергии нелинейным потребителем и снабжающей сетью, а направлены на решение задач продления ресурса работы как длительно эксплуатирующегося, так и нового электромеханического оборудования за счет обслуживания по фактическому техническому состоянию и прогнозу развития дефектов, создающих опасность аварии. Решение поставленной задачи в рамках испытаний и диагностики электрических машин переменного тока позволит привести режим работы двигателя к режиму при питании от идеальной сети, что существенно упростит идентификацию нелинейностей и анализ ухудшения технического состояния электромеханической системы.

**Анализ предыдущих исследований.** На сегодняшний день проблема определения степени влияния потребителя на питающую сеть полностью не решена. Существующие методы требуют наличия параметров либо частотных характеристик элементов сети и потребителей. Получение такой информации в полном объёме обычно затруднительно. Методы, основанные на анализе экспериментов при изменении режима работы питающей сети или параметров потребителя являются малоэффективными [3]. Ряд методов построен на коэффициентах, определяющих отклонение потребителя от линейных характеристик [5], или основанных на соотношениях составляющих тока прямой и обратной последовательностей [6]. При этом теряется физический смысл протекания процесса, и отсутствует возможность чёткого разделения некачественности сети, и искажений, вносимых нелинейным потребителем.

В последнее время появляется большое количество работ, в которых оценка энергорежимов выполняется на основании анализа мгновенной мощности электрических сигналов [7]. Сигнал мгновенной мощности получают на основании мгновенных значений токов и напряжений. Пусть ток и напряжение фазы описываются зависимостями, соответственно [4,7]:

$$i(t) = \sum_{n=0}^N I_n \cdot \cos(\Omega_n t + \psi_n); \quad u(t) = \sum_{m=0}^M U_m \cdot \cos(\Omega_m t + \varphi_m).$$

Выполнив необходимые тригонометрические преобразования, получим:

$$i(t) = \sum_{n=0}^N I_{an} \cos(\Omega_{nd} \cdot t) + \sum_{n=0}^N I_{bn} \sin(\Omega_{nq} \cdot t); \quad u(t) = \sum_{m=0}^M U_{am} \cos(\Omega_{md} \cdot t) + \sum_{m=0}^M U_{bm} \sin(\Omega_{mq} \cdot t),$$

где  $I_{an} = I_n \cos(\psi_n)$ ,  $U_{am} = U_m \cos(\varphi_m)$  – косинусные, а  $I_{bn} = -I_n \sin(\psi_n)$ ,  $U_{bm} = -U_m \sin(\varphi_m)$  – синусные составляющие сигналов.

Тогда, с учётом тригонометрических преобразований, мгновенная мощность представится следующим выражением:

$$p(t) = i(t) \cdot u(t) = P_{0\Sigma} + \sum_{k=1}^{M+N} P_{ka} \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^{M+N} P_{kb} \sin(k\Omega t). \quad (1)$$

Согласно [8,9] коэффициенты, входящие в (1) представляют:  $P_{0\Sigma}$  – постоянную составляющую мгновенной мощности,  $P_{ka}$  – амплитуду косинусной составляющей мгновенной мощности,  $P_{kb}$  – амплитуду синусной составляющей мгновенной мощности.

Мгновенная мощность является функцией, однозначно описывающей процессы в конкретной системе. При этом информативным является механизм формирования отдельных гармоник мощности на основании гармоник

тока и напряжения [10]. Анализируя характеристики мгновенной мощности электрических сигналов (среднее значение, гармонический состав и т.п.), можно получить некие зависимости, однозначно отвечающие происходящим в электрических машинах (ЭМ) процессам.

**Цель исследований.** Разработка метода определения степени взаимного влияния потребителя и питающей сети на основании анализа мгновенной мощности в точке подключения.

**Материал и результаты исследований.** Для решения указанной задачи было проведено моделирование участка электрической сети с потребителем, схема которого представлена на рис. 1. В математическом пакете Matlab была составлена модель данного участка, в результате моделирования получены мгновенные значения сигналов тока в цепи, а также сигналов напряжения на источнике и в точке подключения потребителя.

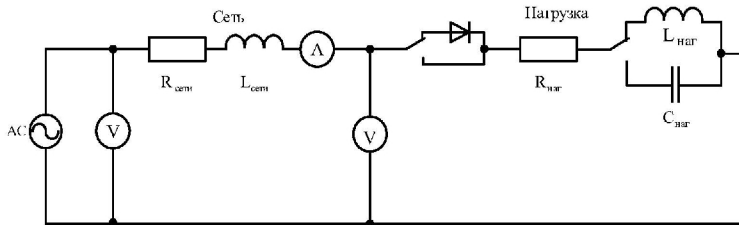


Рис. 1 – Исследуемая схема участка электрической цепи

Моделирование проводилось для нескольких случаев:

- сеть синусоидальна, потребитель линейный;
- сеть синусоидальна, потребитель нелинейный (последовательно катушке подключена нелинейность типа «диод»);
- сеть несинусоидальна (гармоники 1, 3 или 1,3,5), потребитель линейный;

– сеть несинусоидальна (гармоники 1, 3 или 1,3,5), потребитель нелинейный (последовательно катушке подключена нелинейность типа «диод»).

Для анализа составляющих, формирующих ту или иную гармонику мгновенной мощности, была разработана программа, рассчитывающая символичные выражения формирования отдельных гармоник мощности на основании гармоник тока и напряжения [11].

Поскольку метод мгновенной мощности оперирует ортогональными составляющими отдельных гармоник, то их можно анализировать в комплексной плоскости. При этом для каждой гармоники мгновенной мощности векторную диаграмму необходимо строить отдельно. Это связано с тем, что каждая гармоника мгновенной мощности имеет свою частоту и формируется из составляющих тока и напряжения разных частот.

Наиболее простым представляется проведение анализа сигнала мгновенной мощности по его постоянной составляющей, которая формируется составляющими тока и напряжения с одинаковыми частотами.

По составляющим нулевой гармоники мгновенной мощности для указанных выше вариантов участка электрической сети была построена векторная диаграмма в комплексной системе координат.

Рассмотрим пример построения диаграммы для 0-й гармоники сигнала мгновенной мощности при несинусоидальности питания (1-я и 3-я гармоники), и наличии в нагрузке нелинейности типа «диод». В результате работы программы получены следующие выражения для составляющих нулевой гармоники мгновенной мощности (рис. 2).

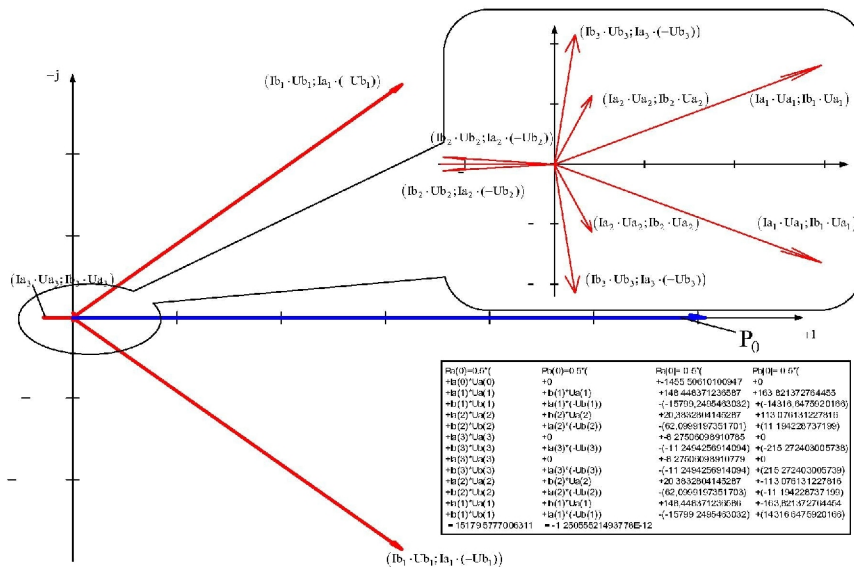


Рис. 2 – Векторная диаграмма формирования нулевой гармоники мгновенной мощности

Из составляющих вещественной и мнимой частей 0-й гармоники мгновенной мощности, полученных из произведений гармоник тока и напряжения одной частоты, можно построить векторы в комплексной системе координат. При этом, произведению вещественных частей одночастотных гармоник тока и напряжения в вещественной составляющей 0-й гармоники мощности будет соответствовать произведение мнимой части гармоники тока на вещественную часть гармоники напряжения в мнимой составляющей гармоники мощности, а произведению мнимых частей вещественной части – произведению

вещественной части гармоники тока на мнимую часть гармоники напряжения. Например, координаты вещественной части вектора, сформированного 1-ми гармониками тока и напряжения будут вычисляться из выражения:  $Ia(1)*Ua(1)$ , а соответствующие ему координаты мнимой части:  $Ib(1)*Ua(1)$ .

В результате анализа векторных диаграмм, полученных для указанных выше случаев, было замечено, что суммарный вектор всех составляющих гармоники мгновенной мощности, сформированной одночастотными гармониками тока и напряжения, лежит на действительной (косинусной) оси, и направлен либо в положительную, либо в отрицательную сторону. Таким образом, для данного случая получим следующую векторную диаграмму, сформированную из составляющих 0-й гармоники мгновенной мощности (рис. 2).

Анализируя составляющие мгновенной мощности в точке подключения потребителя к питающей сети во всех рассматриваемых случаях было установлено, что по направлению данного вектора можно судить о том, формируются ли гармоники тока и напряжения данной частоты питающей сетью, либо нагрузкой: суммарный вектор гармоник, сформированных питающей сетью, направлен в положительную сторону по действительной оси; сформированных потребителем – в отрицательную.

В некоторых рассмотренных случаях гармоники тока и напряжения отдельных частот формируются как потребителем, так и нагрузкой. При этом возможна взаимная компенсация определённых гармоник тока и напряжения. Для долевого разделения искажений в точке подключения потребителей рассмотрим схему замещения системы питающая сеть – нелинейный потребитель (рис. 3). Решение поставленной задачи может быть осуществлено при исключении из рассмотрения параметров потребителя и анализе напряжения в точке подключения. При этом питающая сеть представляется линейным объектом с сосредоточенными параметрами активно-индуктивного характера, что является справедливым для сетей напряжением до 1000 В.

Уравнения баланса гармоник напряжения для такой схемы:

$$\dot{U}_{Hv} = \dot{E}_{Hv} - \dot{I}_v \cdot \dot{Z}_{Cv} \text{ - для доминирующих гармоник напряжения источника питания;}$$

$\dot{U}_{Hv} = \dot{E}_{Hv} + \dot{I}_v \cdot \dot{Z}_{Cv}$  - для доминирующих гармоник напряжения, сформированных нелинейным потребителем, где  $v$  - номер гармоники,  $\dot{U}_{Hv}$  - гармоника напряжения на зажимах потребителя,  $\dot{E}_{Hv}$  и  $\dot{E}_{Hv}$  - гармоники э.д.с. источника питания и нелинейной нагрузки,  $\dot{I}_v$  - гармоника тока,  $\dot{Z}_{Cv}$  и  $\dot{Z}_{Hv}$  - полное комплексное сопротивление участка сети и нелинейного потребителя.

Решение этой задачи при неизвестных гармониках э.д.с. источника  $\dot{E}_{Hv}$  и параметров сети

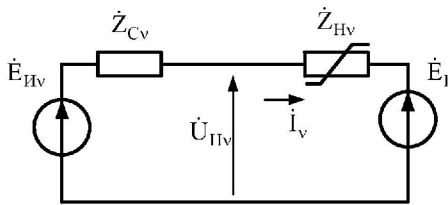


Рис. 3 –Схема замещения системы питающая сеть – нелинейный потребитель

$\dot{Z}_{Cv} = R_C + jv\omega L_C$  на основе приведенной системы не представляется возможным. Выход может быть найден при использовании уравнений баланса составляющих мгновенной мощности. Уравнения баланса составляющих мощности имеют вид:

$$\begin{cases} P_{0H} = P_{0H} \pm P_{0RC}; \\ P_{kaII} = P_{kaII} \pm (P_{kaLC} + P_{kaRC}); \\ P_{kbH} = P_{kbH} \pm (P_{kbLC} + P_{kbRC}). \end{cases}$$

– для источника:

$$\begin{aligned} P_{0H} &= \frac{1}{2} \left[ \sum_{m=1}^M U_{Ham} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{m=1}^M U_{Ham} \sum_{n=1}^N I_{an} \right]; \\ P_{kaII} &= \frac{1}{2} \left( \sum_{m=1}^M U_{IIam} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{m=1}^M U_{IIam} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{m=1}^M U_{IIbm} \sum_{n=1}^N I_{bn} - \sum_{m=1}^M U_{IIbm} \sum_{n=1}^N I_{bn} \right); \\ P_{kbH} &= \frac{1}{2} \left( \sum_{m=1}^M U_{Ham} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{m=1}^M U_{Ham} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{m=1}^M U_{Hbm} \sum_{n=1}^N I_{an} - \sum_{m=1}^M U_{Hbm} \sum_{n=1}^N I_{an} \right); \end{aligned}$$

– для индуктивности сети:

$$P_{0LC} = 0;$$

– для мощности на зажимах потребителя:

$$\begin{aligned} P_{0H} &= \frac{1}{2} \left[ \sum_{m=1}^M E_{IIam} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{m=1}^M E_{IIbm} \sum_{n=1}^N I_{bn} \right]; \\ P_{kaII} &= \frac{1}{2} \left( \sum_{m=1}^M E_{IIam} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{m=1}^M E_{IIam} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{m=1}^M E_{IIbm} \sum_{n=1}^N I_{bn} - \sum_{m=1}^M E_{IIbm} \sum_{n=1}^N I_{bn} \right); \\ P_{kbH} &= \frac{1}{2} \left( \sum_{m=1}^M E_{IIam} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{m=1}^M E_{IIam} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{m=1}^M E_{IIbm} \sum_{n=1}^N I_{an} - \sum_{m=1}^M E_{IIbm} \sum_{n=1}^N I_{an} \right); \end{aligned}$$

– для активного сопротивления сети:

$$P_{0RC} = R_C \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N I_n^2;$$

$$P_{kaLC} = L_C \frac{\Omega}{2} \left( \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M k I_{am} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{m=1}^M k I_{am} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \\ k=m+n, m<n \quad k=|m-n|, m<n \\ + \sum_{m=1}^M k I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{an} - \sum_{m=1}^M k I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{n=1}^N \frac{k}{2} I_{bn}^2 \\ k=m+n \quad k=|m-n|, m<n \quad k=2n \end{array} \right);$$

$$P_{kaRC} = R_C \frac{1}{2} \left( \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M 2I_{am} \sum_{n=1}^N I_{an} - \sum_{m=1}^M 2I_{am} \sum_{n=1}^N I_{an} - \\ k=m+n, m<n \quad k=|m-n|, m<n \\ - \sum_{m=1}^M 2I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{m=1}^M 2I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{n=1}^N I_{an}^2 \\ k=m+n \quad k=|m-n|, m<n \quad k=2n \end{array} \right);$$

$$P_{kbLC} = L_C \frac{\Omega}{2} \left( \begin{array}{l} - \sum_{m=1}^M k I_{am} \sum_{n=1}^N I_{an} - \sum_{m=1}^M k I_{am} \sum_{n=1}^N I_{an} + \\ k=m+n, m<n \quad k=|m-n|, m<n \\ + \sum_{m=1}^M k I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{bn} - \sum_{m=1}^M k I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{n=1}^N \frac{k}{2} I_{an}^2 \\ k=m+n \quad k=|m-n|, m<n \quad k=2n \end{array} \right);$$

$$P_{kbRC} = R_C \frac{1}{2} \left( \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M 2I_{am} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \sum_{m=1}^M 2I_{am} \sum_{n=1}^N I_{bn} + \\ k=m+n, m<n \quad k=|m-n|, m<n \\ + \sum_{m=1}^M 2I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{an} - \sum_{m=1}^M 2I_{bm} \sum_{n=1}^N I_{an} + \sum_{n=1}^N I_{bn}^2 \\ k=m+n \quad k=|m-n|, m<n \quad k=2n \end{array} \right);$$

где  $I_{am}, I_{bm}, I_{an}, I_{bn}$  – косинусные и синусные составляющие гармоник тока порядка  $m$  и  $n$ ;

$U_{Ham}, U_{Hbm}, E_{Iam}, E_{Ibm}$  – косинусные и синусные составляющие гармоник напряжения на нагрузке и э.д.с. источника питания.

При этом, рассматриваемая задача, по сути, является задачей идентификации линейных параметров сети. Подобного класса задачи, в приложении к идентификации электромагнитных параметров электрических машин переменного тока, прошли достаточную апробацию [4]. Отличительной особенностью является работа с низкими значениями гармоник тока и напряжения, генерируемыми нелинейным потребителем. Поэтому для решения системы уравнений баланса составляющих мгновенной мощности необходимо использовать современные экспертные и адаптивные алгоритмы улучшения сходимости решения.

**Выводы.** Анализ компонент нулевой составляющей мгновенной мощности позволяет по направлению суммарного вектора, сформированного одночастотными составляющими гармоник тока и напряжения, определить, какие гармоники напряжения поступают в точку подключения из питающей сети, а какие генерируются нелинейным потребителем. Определение вклада потребителя и нагрузки в формирование гармоник различных частот осуществляется на основе решения системы уравнений баланса составляющих мгновенной мощности источника питания, участка сети и мощности на зажимах потребителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петухов В., Соколов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники №1(31) 2005.
2. Aditya Korde В.Е. On-line condition monitoring of motors using electrical signature analysis // presented at 'Recent advances in condition-based plant maintenance' seminar 17-18 May 2002.
3. Review of Methods for Measurement and Evaluation of the Harmonic Emission Level from an Individual Distorting Load CIGRE 36.05 / CIRED 2 Joint WG CC02 1999.
4. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной четырнадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007, - С. 273-278
5. Черный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, 2004, вип.15 – С. 160-168.
6. Захарченко П.И., Сивкобыленко В.Ф., Полковниченко Д.В., Чекавский Г.С. Контроль справності обмоток короткозамкнутых асинхронных электродвигунів // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. - Вип. 4/2005 (33). - Кременчук: КДПУ, 2005. - С. 89-92.
7. Родькин Д.И., Новая система показателей качества использования электрической энергии // Науковий вісник НГУ, 2004, №3, С. 20-26.
8. A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Spase Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits, Aktira Nabal, Toshihiko Tanaka, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No 3, 1996, p. 1244-1250.
9. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Assymetry Gzarnecki L, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11 No 3 1996 p. 1244-1250.
10. Сидоренко В.М., Родькін Д.Й., Чорний О.П., Мамчур Д.Г. Автоматизація розрахунку складових миттєвої потужності електричних сигналів // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. - Вип. 3 (26). - Кременчук: КДПУ, 2004. - С. 91-96.
11. Родькін Д.Й., Сидоренко В.М., Чорний О.П., Мамчур Д.Г. Програмний продукт «Комп'ютерна програма розрахунку символічних виразів складових сигналів миттєвої потужності електричних сигналів» // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №12522.