

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Белаш И. П., Савченко А. А.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко**В работе показан подход по расчету электрических нагрузок с использованием метода мгновенных значений, который позволяет раскрыть возможности повышения эффективности систем электроснабжения.*

Постановка проблемы. Сегодня Украина испытывает дефицит основных энергоносителей, таких как нефть и газ, и вынуждена покупать их по завышенным ценам. И в то же время в Украине на выпуск единицы продукции в ряде отраслей расходуется энергии в два-три раза больше, чем в странах Европы.

Большой расход энергии, имеющей высокую цену, делает продукцию, производимую в Украине, неконкурентной на рынке и ведет к закрытию убыточных производств, к безработице.

Рост цен на топливо, нефтепродукты и тарифов на электроэнергию, которые не сбалансированы с ценами на товары, продукты и тарифами на коммунальные услуги, ведет к сложным экономическим ситуациям, к росту социальной напряженности в обществе.

Поэтому повышение энергетической и экономической эффективности производства сегодня является задачей первостепенной важности для каждого жителя Украины, так как затрагивает жизненные интересы всех.

Любое повышение тарифов на энергию вызывает законный вопрос об их обоснованности. Гарантией обоснованности является точный учет электрических нагрузок и правильный выбор мощности элементов электроустановок, что определяет расход материалов, стоимость оборудования и составляющую тарифа, зависящую от стоимости электроустановок. Точная оценка потерь энергии, зависящих от величины нагрузок, определяет вторую составляющую тарифа, связанную с передачей энергии. Отпускной тариф зависит от стоимости выработки и передачи энергии.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время расчет нагрузок в сетях переменного тока выполняется по методу комплексных чисел [1–4]. Передача энергии от источника к приемнику представляется как два независимых процесса:

- передачи активной энергии для выполнения полезной работы, для преобразования ее в другие виды энергии и для покрытия потерь на нагрев;

- циркуляции (колебания) реактивной энергии от источника к нагрузке и в обратном направлении.

При таком представлении передачи, когда считается, что вся накопленная в магнитном поле индуктивного элемента нагрузки энергия возвращается к источнику, среднее значение реактивной мощности за один период равно нулю. Поэтому утверждается, что на выработку реактивной энергии топливо, энергоресурсы не расходуются, и по этой причине реактивная энергия не является продуктом, товаром. Но ее передача сопровождается потерями.

Такое представление не согласуется с реальностью. Ситуация, когда активная энергия, потребляемая приемником, поступает в полном объеме от источника в виде прямого потока, возможна только при работе с коэффициентом мощности, равным 1.

Так, например, при работе приборов люминесцентного освещения потери энергии на нагрев стали дросселя, включенного в цепь с лампами, покрываются за счет энергии магнитного поля, так как иного способа передачи энергии от обмотки к стали магнитопровода дросселя не существует, ибо обмотка дросселя изолирована от магнитопровода. И, если часть потребности в активной энергии на нагрев стали покрывается за счет энергии магнитного поля, то прямой поток активной энергии от источника к приборам освещения будет меньше на эту величину.

И, в то же время, ситуация, когда вся накопленная в магнитном поле индуктивного элемента нагрузки энергия возвращается к источнику, возможна только при значении коэффициента мощности, равном нулю. Но такая передача бессмысленна, так как при этом не совершается никакая полезная работа. При значениях коэффициента мощности, больших нуля, когда часть запаса энергии магнитного поля индуктивности израсходована на покрытие тепловых потерь в стали дросселя, к источнику вернется не вся накопленная ранее энергия, а лишь ее остаток.

В связи с этим, расчет нагрузок по методу комплексных чисел вызывает сомнения. Возникает предположение, что этот метод недостаточно точен и является одной из причин снижения энергетической эффективности систем электроснабжения.

Проблемы энергетической эффективности обязывают подойти более ответственно к вопросу определения электрических нагрузок, так как их расчетные значения являются базой для определения установленной мощности оборудования, определяют расход проводниковых, магнитных, изоляционных, конструкционных материалов, расход топлива, объемы перевозок, затраты на конструирование, транспортирование, монтаж, эксплуатацию оборудования, его стоимость и составляющую тарифа на выработку энергии. По значениям нагрузок оценивают потери энергии и определяют составляющую тарифа на передачу энергии от источников ее выработки к потребителям.

Цель исследований. Повышение эффективности систем электроснабжения на основе уточнения электрических нагрузок с использованием метода мгновенных значений.

Основные материалы исследований. Представим, что к сети переменного трехфазного тока про-

мышленной частоты присоединена симметричная трехфазная нагрузка, сопротивление каждой фазы которой равно Z , рис.1. Угол сопротивления нагрузки равен φ .

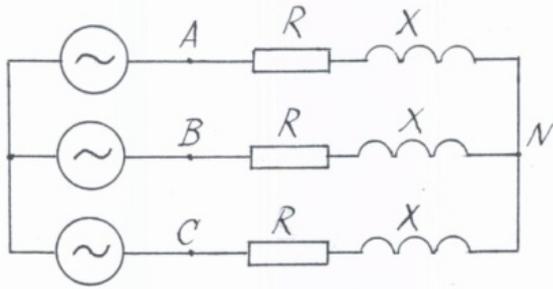


Рисунок 1 – Электрическая сеть трехфазного переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой

Допустим, что мгновенное значение фазного напряжения на зажимах нагрузки равно

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t), \text{ В}, \quad (1)$$

где $\sqrt{2}$ - коэффициент амплитуды синусоидальной функции;

U – действующее значение напряжения, В;

ω – угловая частота напряжения сети, с^{-1} ;

t – текущее значение времени, с.

В цепи будет протекать ток, мгновенное значение которого будет равно

$$i = \sqrt{2} (U/Z) \sin(\omega t - \varphi), \text{ А}. \quad (2)$$

Мгновенное значение мощности p_{II} , подводимой от источника к нагрузке

$$p_{II} = (U^2 / Z) [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)], \text{ ВА}. \quad (3)$$

Мгновенное значение мощности p_R , выделяющейся в виде тепла на активном сопротивлении R ,

$$p_R = (U/Z)^2 R [1 - \cos(2\omega t - 2\varphi)], \text{ ВА}. \quad (4)$$

Мгновенное значение мощности, поступающей в магнитное поле индуктивного элемента нагрузки сопротивлением X ,

$$p_X = - (U/Z)^2 X \cos(2\omega t - 2\varphi + \pi/2), \text{ ВА}. \quad (5)$$

Графики изменения напряжения и тока показаны на рис. 2 (а), а графики мощностей – на рис. 2(б).

Мгновенная мощность $p_{II}(t)$, подводимая от источника к нагрузке, имеет положительные значения тогда, когда мгновенные значения напряжения и тока в цепи имеют одинаковые знаки. В этом интервале времени источник отдает энергию.

Мгновенная мощность $p_{II}(t)$ отрицательна, когда знаки напряжения и тока различны. При этом источник не генерирует, а потребляет энергию. Поэтому важно знать, когда каждая из функций мгновенных значений мощностей меняет свое поведение. Это будет в те моменты времени, когда та или иная функция переходит через нулевое значение.

Мгновенная мощность $p_R(t)$, выделяющаяся на активном сопротивлении, всегда положительна, она может принимать нулевые значения, но не переходит через нуль.

Когда мгновенная мощность $p_X(t)$ имеет положительные значения – идет процесс накопления энергии в магнитном поле индуктивности. Когда же эта функция имеет отрицательные значения – идет процесс отдачи энергии индуктивным элементом.

Рассмотрим один период изменения мощности $p_{II}(t)$ от t_1 до t_4 , рис.2(б). Этот диапазон делится на три интервала.

Первый интервал времени от t_1 до t_2 , в течение которого в любой момент времени установившегося режима работы цепи мгновенная мощность $p_{II}(t)$, поступающая от источника к нагрузке, равна сумме мгновенных значений мощности $p_R(t)$, расходуемой на активном сопротивлении, и мощности $p_X(t)$, поступающей в магнитное поле индуктивности, рис. 2(в)

$$p_{II1} = p_{R1} + p_{X1}, \text{ ВА}. \quad (6)$$

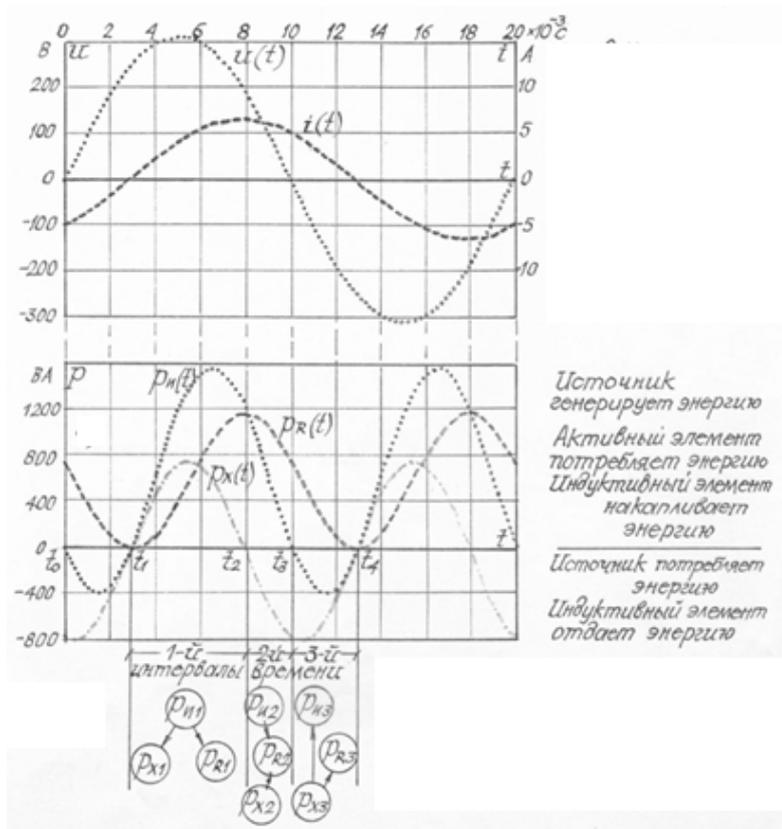
В течение этого интервала начинается и заканчивается процесс накопления энергии в магнитном поле индуктивного элемента нагрузки. Баланс мощностей свидетельствует о соблюдении закона сохранения энергии и о том, что на создание запаса энергии в магнитном поле расходуется топливо и энергоресурсы так же, как и на выделение тепла на активном сопротивлении нагрузки.

Второй интервал времени от t_2 до t_3 , в течение которого в любой момент времени установившегося режима работы цепи мгновенная мощность $p_R(t)$, расходуемая на активном сопротивлении, равна сумме мгновенной мощности $p_{II}(t)$, подводимой от источника, и мощности $p_X(t)$, отдаваемой индуктивным элементом из созданного в 1-м интервале времени запаса, рис. 2(в)

$$p_{II2} + p_{X2} = p_{R2}, \text{ ВА}. \quad (7)$$

При этом запас энергии магнитного поля снижается, так как во 2-м интервале индуктивный элемент нагрузки выполняет роль источника питания, дополняя количество энергии генератора до полной потребности активного элемента нагрузки.

Третий интервал времени от t_3 до t_4 , в течение которого в любой момент времени установившегося режима работы цепи мгновенная мощность p_X , отдаваемая индуктивностью из созданного в 1-м интервале времени запаса энергии, равна сумме мгновенной мощности p_R , выделяющейся на активном сопротивлении, и мощности p_{II} , возвращаемой источнику, рис. 2(в)



а) кривые изменения напряжения и тока;

б) изменение мгновенных значений мощностей элементов цепи;

в) ход обмена энергией в отдельных интервалах времени.

Рисунок 2 – Энергетические процессы в цепи с активно-индуктивной нагрузкой

$$p_{R3} + p_{I3} = p_{X3}, \text{ ВА.} \quad (8)$$

Факт питания активного элемента нагрузки во 2-м и 3-м интервалах времени за счет запаса энергии магнитного поля индуктивного элемента свидетельствует о том, что на создание запаса энергии магнитного поля израсходовано топливо и энергоресурсы.

Энергия магнитного поля такой же продукт, как и энергия, расходуемая на активном сопротивлении нагрузки. Она принимает активное участие в обменных процессах, происходящих в цепи.

Таблица 1 – Значения количества энергии элементов цепи с активно-индуктивной нагрузкой в отдельных интервалах времени одного периода изменения мощности

Интервал, длительность	W_{II} , Дж	W_R , Дж	W_X , Дж
1-й, $5 \cdot 10^{-3}$ с	5,368991722 выдача	2,904 потребление	2,464991722 накопление
2-й, $2,048327647 \cdot 10^{-3}$ с	1,189668698 генерирование	2,077065716 потребление	-0,887397021 отдача
3-й, $2,951672353 \cdot 10^{-3}$ с	-0,750660419 потребление	0,826934284 потребление	-1,577594702 отдача и возврат

Количество энергии, выделившейся на активном сопротивлении в 1-м интервале,

$$W_{R1} = \int_{t_1}^{t_2} p_{R1}(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} (U/Z)^2 R [1 - \cos(2\omega t - 2\varphi)] dt, \text{ Дж.} \quad (10)$$

Докажем правильность этих выводов.

Проведем расчеты количества выработанной, отданной, переданной в разных направлениях, накопленной и использованной энергии в каждом из указанных интервалов. Для этого примем исходные данные $U = 220$ В, $f = 50$ Гц, $Z = 50$ Ом, $\cos \varphi = 0,6$.

Количество энергии, подведенной от источника к нагрузке в 1-м интервале

$$W_{II1} = \int_{t_1}^{t_2} p_{II1}(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} (U^2/Z) [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] dt, \text{ Дж.} \quad (9)$$

Количество энергии, накопленной в магнитном поле индуктивности в 1-м интервале,

$$W_{X1} = \int_{t_1}^{t_2} p_{X1}(t) dt = - \int_{t_1}^{t_2} (U/Z)^2 X \cos(2\omega t - 2\varphi + \pi/2) dt, \text{ Дж.} \quad (11)$$

Аналогично определяется количество энергии отдельных элементов схемы в двух других интервалах времени. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Как видно из результатов расчета, для всех временных интервалов выполняется условие баланса энергии. На создание запаса энергии магнитного поля индуктивного элемента источником энергии было передано 2,465 Дж энергии, а возвращено источнику индуктивным элементом только около 0,751 Дж (только 30,453%). Циркуляция энергии $W_{ц}$ определяется количеством возвращенной источнику энергии и равна 0,750660419 Дж. Вопрос о причинах и механизме циркуляции, о количестве циркулирующей в цепи энергии в данной работе не рассматривается по причине ограничения объема.

Используя данные о выработке, отдаче, накоплении, потреблении энергии за один период изменения мощности, определим расчетные нагрузки генератора, линии и приемника энергии.

Таблица 2 – Нагрузки элементов сети с активно-индуктивной нагрузкой по методу мгновенных значений и по методу комплексных чисел

Показатели расчета	По методу мгновенных значений	По методу комплексных чисел
Мощность выработки генератора, как показатель расхода топлива	580,8 Вт	580,8 Вт
Мощность, отдаваемая генератором приемнику, как показатель электрической нагрузки (генерируемая мощность плюс мощность циркуляции)	655,866 Вт	968 ВА
Мощность передачи линии в прямом направлении	655,866 Вт	968 ВА
Мощность передачи линии в обратном направлении	75,066 Вт	774,4 ВА _р
Мощность, поступающая в магнитное поле индуктивного элемента нагрузки	246,499 Вт	774,4 ВА _р
Часть мощности индуктивного элемента, отдаваемая активному элементу	171,433 Вт	-
Часть мощности индуктивного элемента, возвращаемая источнику	75,066 Вт	774,4 ВА _р
Мощность, потребляемая активным элементом нагрузки	580,8 Вт	580,8 Вт
– в том числе, мощность прямого потока от генератора к приемнику	409,367 Вт	580,8 Вт
– в том числе, мощность, получаемая от индуктивного элемента	171,433 Вт	-

Для сравнения, проведем расчет нагрузок по методу комплексных чисел [2]. При указанных исходных условиях (значениях напряжения, частоты

напряжения, сопротивления, угла сопротивления нагрузки) комплекс действующего значения напряжения на зажимах фазы электроприемника

$$\dot{U} = U e^{j\varphi}, \text{ В}; \quad (13)$$

$$\dot{U} = 220 e^{j0} \text{ В.}$$

Комплексное сопротивление нагрузки

Количество энергии, выработанной или потребленной за единицу времени, равную одной секунде, или интегральное значение мощности нагрузки, определится по выражению

$$P = W^{(1)} = 2f \cdot W, \text{ ВА}, \quad (12)$$

где P – мощность нагрузки, равная количеству выработанной, накопленной или потребленной энергии $W^{(1)}$ за единицу времени в одну секунду, ВА=Дж/с;

W – количество выработанной, отданной, накопленной, преобразованной или возвращенной источнику энергии за один период изменения мощности, Дж;

f – частота напряжения сети, Гц.

Результаты расчета нагрузок по методу мгновенных значений величин показаны в табл. 2.

$$\underline{Z} = z \cos \varphi + j z \sin \varphi = z e^{j\varphi}, \text{ Ом}; \quad (14)$$

$$\underline{Z} = 50 \cdot 0,6 + j 50 \cdot 0,8 = 30 + j 40 = 50 e^{j53} \text{ Ом.}$$

Комплекс действующего значения тока в цепи

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}, \text{ А}; \quad (15)$$

$$\dot{I} = \frac{220}{50 e^{j53}} = 4,4 e^{-j53} \text{ А.}$$

Комплекс, сопряженный комплексу действующего тока,

$$I = 4,4e^{j53} \text{ A.}$$

Полная мощность S , подводимая от источника к приемнику, и ее составляющие – активная P и реактивная Q мощности

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \dot{U} I^* = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + j Q, \text{ ВА}; \quad (16) \\ \bar{S} &= 220 \cdot 4,4e^{j53} = 968e^{j53} = 580,8 + j 774,4 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Результаты расчета нагрузок по методу комплексных чисел также приведены в табл. 2.

Как видно, метод комплексных чисел дает завышенные значения электрических нагрузок, что ведет к перерасходу материалов, топлива, капитальных вложений и снижению эффективности системы электроснабжения.

Выводы

1. При выполнении расчетов нагрузок по методу комплексных чисел энергия магнитного поля представляется как реактивная (неактивная), не принимающая участия в процессах обмена, и что, после завершения процесса накопления, она в полном количестве возвращается к источнику. Так как функция мгновенных значений мощности, поступающей в магнитное поле индуктивного элемента нагрузки или отдаваемая из магнитного поля, симметрична относительно оси времени, ее среднее значение за один период равно нулю. Поэтому утверждается, что на выработку энергии магнитного поля топливо, энергоресурсы не расходуются. При выполнении расчетов нагрузок по методу мгновенных значений мы имеем возможность убедиться в том, что энергия магнитного поля принимает активное участие в обменных процессах. Энергия магнитного поля – это не вид энергии, а лишь форма ее существования. Она действительна, реальна. В этом можно убедиться на основании выражений (6), (7), (8), (9), (10), (11).

2. По методу комплексных чисел прямой поток энергии к активному элементу нагрузки за единицу времени равен активной мощности нагрузки.

3. По методу мгновенных значений прямой поток энергии от источника к активному элементу нагрузки за единицу времени составляет лишь часть мощности, преобразуемой активным элементом.

4. По методу комплексных чисел вся, накопленная в магнитном поле индуктивного элемента нагрузки, энергия возвращается к источнику. По методу мгновенных значений часть энергии магнитного поля передается активному элементу нагрузки для обеспечения его потребности.

5. При выполнении расчетов по методу комплексных чисел мощность циркуляции равна реактивной мощности, определяемой по выражению:

$$Q = UI \sin \varphi, \text{ ВАр.} \quad (17)$$

По методу мгновенных значений к источнику возвращается лишь неиспользованная часть запаса энергии магнитного поля, табл. 1.

6. Метод комплексных чисел, по причинам, отмеченным в п.п. 1 ... 4, дает завышенные значения электрических нагрузок, что ведет к перерасходу материалов, топлива, капитальных вложений и снижению эффективности систем электроснабжения. Применение метода мгновенных значений при выполнении расчетов электрических нагрузок, оценке потерь энергии дает возможность избежать ошибок метода комплексных чисел, повысить энергетическую и экономическую эффективность электропередачи.

Список использованных источников

1. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М.: "Высшая школа", 1990.
2. Паначевний Б. І. Електротехніка / Б. І. Паначевний. – Харків: "Торнадо", 1999.
3. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола / В. С. Перхач. – Київ: "Вища школа", 1992.
4. Паначевний Б. І. Загальна електротехніка. Теорія і практикум / Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свергун. – Київ: "Каравела", 2003.
5. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами / Наказ Міністерства палива та енергетики України від 17 січня 2002 року, № 19.

Анотація

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Білаш І. П., Савченко О. А.

В роботі показано підхід щодо розрахунку електричних навантажень з використанням методу миттєвих значень, який дозволяє розкрити можливості підвищення ефективності систем електропостачання.

Abstract

INCREASE OF EFFICIENCY OF THE POWER SUPPLY SYSTEMS

I. Bilash, O. Savchenko

Approach of the calculation of the electric loading with the use of method of instantaneous values is shown, that allows to expose possibilities of increase of efficiency of the power supply systems.