

УДК: 621.3.011.72.001.3

### ЭНЕРГОПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ\*

Д. А. Мосюндз

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: darya\_mosyundz@mail.ru

Рассмотрены возможности применения энергетического метода в задаче идентификации параметров нелинейной индуктивности. Показано, что такой подход на основе баланса мощностей элементов источника и потребителя на каждой гармонике позволяет получить необходимое количество уравнений для определения параметров. Рассмотрены возможности энергетического метода в задачах анализа энергопроцессов в нелинейных цепях, предложен математический аппарат, позволяющий учитывать основные свойства нелинейности и упростить математический расчет определения коэффициентов. Аналитически показан способ определения параметров нелинейной индуктивности с учетом потерь.

**Ключевые слова:** энергетический метод, энергодиагностика, идентификация, нелинейная индуктивность.

### ЕНЕРГОПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНИМ МЕТОДОМ

Д. А. Мосюндз

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: darya\_mosyundz@mail.ru

Розглянуто можливості застосування енергетичного методу у задачах ідентифікації параметрів нелінійної індуктивності. Показано, що такий підхід на основі балансу потужностей елементів джерела живлення та споживача на кожній гармоніці дозволяє отримати необхідну кількість рівнянь для визначення параметрів. Розглянуто можливості енергетичного методу в задачах аналізу енергопроцесів у нелінійних колах, запропоновано математичний апарат, що дозволяє враховувати основні властивості нелінійностей та спростити математичні розрахунки при визначенні коефіцієнтів. Аналітично показано спосіб визначення параметрів нелінійної індуктивності з урахуванням втрат.

**Ключові слова:** енергетичний метод, энергодиагностика, ідентифікація, нелінійна індуктивність.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Поиск путей, позволяющих описывать и анализировать энергетические процессы в электромеханических системах, является одним из важных направлений в электромеханике. Существующие методы анализа направлены на рассмотрение энергопроцессов предпочтительно на выходе источника. Однако для энергоэффективного управления и повышения качества преобразования энергии необходимо решение задачи учета энергообмена между источником и потребителем путем оценки мгновенных значений сигналов, которые отражают физический процесс в каждый момент времени [1, 2].

Для анализа энергетических процессов в электротехнике широко используются понятия активной, реактивной и полной мощности. Однако ряд исследований показал, что такой подход не соответствует закону сохранения энергии [3, 4]. Оправданным является использование метода мгновенной мощности, математический аппарат которого позволяет дать оценку энергопроцессам и эффективности использования энергии потребителем. Развитие теории мгновенной мощности привело к выводу о том, что более значительное число составляющих, чем две (активная и реактивная), и соответствующее представление данных об энергопроцессах исследуемых объектов позволяет выявить особенности энергетических режимов и характер обменных и накопительных процессов между источником питания и отдельными элементами потребителя. Такой подход позволил создать энергетический метод, используемый при идентификации параметров, на основании анализа реальных сигналов в цепях преобразования энергии, анализа энергетических режимов сложных электрических цепей и систем

[3, 5, 7]. Следует отметить, что процессы, характеризующие энергообмен между источником и потребителем, отличаются сложностью и своими особенностями в математическом описании как для электрических цепей, так и для технологических механизмов самого разного предназначения [2]. В ряде случаев анализ энергопроцессов усложняется наличием нелинейности в цепи. Уравнения, описывающие процессы преобразования энергии, получаются достаточно сложными и трудоемкими в решении. В таких случаях способом решения таких систем является энергетический метод.

Использование энергетического метода в задачах диагностики и определения параметров электрических систем позволяет получить математическую базу для дальнейшего анализа механизмов преобразования энергии между любым элементом потребителя или источником, что повышает качество анализа энергопроцессов.

Таким образом, целью работы является рассмотрение возможностей энергетического метода в задачах анализа энергопроцессов в электрических цепях с нелинейной нагрузкой.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Учет всех особенностей различных элементов и физических процессов в электрических цепях является основным условием при создании математического аппарата для их описания. Одним из таких аппаратов для анализа процессов энергообмена является энергетический метод, который дает возможность получить более информативную оценку, т.к. позволяет учитывать реальные физические процессы, происходящие в электрической цепи.

\*Работа выполнена под руководством проф., д.т.н. Родькина Д. И.

В основе данного метода лежит один из основополагающих законов природы – закон сохранения энергии. Применительно к электротехнике инструментом для его реализации является теорема Телледжена, которая, в свою очередь, позволяет более полно рассмотреть выполнение закона сохранения между источником питания и потребителем [2].

С учетом развития компьютерных технологий интерес к вопросу энергообмена в электрических системах растет, и проблемы энергопотребления, энергоиспользования и энергоуправления (правило трех «Э») с каждым днем становятся все более актуальными [6]. Это правило касается изложения проблемы энергоэффективности. Такой подход к ее рассмотрению приводит нас к понятию энергоресурсосбережения, т.к. широкое толкование энергоэффективности связано как с непосредственным снижением потребления энергии, так и с эффективным использованием материальных ресурсов. Упомянутое правило указывает на необходимость анализа процессов преобразования энергии во всех элементах цепи, определяющей структуру питающей сети электромеханических систем (ЭМС). Указанные элементы могут иметь разную физическую природу, что определяет соответствующую картину преобразования на каждом из них. Весь комплекс этих показателей может быть получен только на основании анализа энергопроцессов во временной области, то есть с использованием метода мгновенной мощности [3, 4].

Однако существенным недостатком является их отдельное рассмотрение друг от друга. Так, например, энергопотребление развито с позиции энергоучета и на этом работают все хозрасчетные механизмы, но при этом оказываются не задействованы механизмы определения компонент энергопроцесса в формировании финансово-экономических взаимоотношений между энергоснабжающей организацией и потребителем.

Задача энергоуправления, как составляющая общей платформы использования электрической энергии, до настоящего времени не сформулирована. Таким образом, для решения поставленной проблемы должен быть уточнен целый ряд вопросов, касающийся затронутой темы, и для получения положительного результата рассматривать вышеизложенные определения необходимо в комплексе.

В связи с освоением устройств преобразовательной техники активно начала развиваться теория энергопроцессов [7]. Интерес к данной теме возрос по нескольким причинам, одной из которых является расширение технических возможностей и их востребованности. При этом возросли требования к точности, информативности и качеству вычислительной и измерительной техники. Работы в данном направлении весьма многочисленны и практически все взаимосвязаны, т.к. в основу положены ранее полученные результаты. Общим и наиболее сложным вопросом оказалось рассмотрение процессов энергообмена в электрических системах с нелинейными элементами. Основной сложностью анализа таких систем является необходимость учета динамических свойств самого элемента и его влияние на систему в целом. Так, например, известно, что при работе нелинейного элемента в цепи переменного тока в последнем протекает

ток, состоящий из бесконечного числа гармонических, кратных частоте сети [8]. Таким образом, нелинейный элемент является не только генератором высших гармоник, но и влияет на качество питающего напряжения.

Существует ряд других особенностей, вызванных наличием нелинейных элементов. Поэтому математический аппарат, описывающий энергетические процессы в таких системах, должен учитывать динамические свойства и характер нелинейности.

С учетом вышесказанного, в работе рассмотрены возможности энергетического метода в задачах анализа энергопроцессов на примере нелинейной индуктивности.

Влияние реактивных элементов на процессы энергообмена в цепи можно показать из баланса эффективных мощностей между источником и потребителем. Эффективная мощность является мерой оценки мгновенной мощности и определяется как среднеквадратичное значение мощности за период, учитывающее как постоянную, так и переменную составляющие мгновенной мощности:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}, \quad (1)$$

где  $P(t)$  – мгновенная мощность;  $T$  – период сигнала мгновенной мощности.

Для электрической схемы замещения, состоящей из источника синусоидального напряжения, активного сопротивления и индуктивности, при условии, что параметры элементов известны, получены выражения для мгновенной мощности:

– на выходе источника питания

$$P_i(t) = U_i(t)I(t); \quad (2)$$

– на активном сопротивлении

$$P_R(t) = U_R(t)I(t) = RI^2(t); \quad (3)$$

– на индуктивности

$$P_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} I(t), \quad (4)$$

где  $I(t) = I_m \cos(\Omega t - \varphi) = I_{1a} \cos(\Omega t) - I_{1b} \sin(\Omega t)$ ;  $U_i(t) = U_n \cos(\Omega t)$ ;  $I_m$  – амплитуда тока;  $U_n$  – амплитуда напряжения;  $R$  – активное сопротивление;  $L$  – индуктивность;  $\varphi$  – угол сдвига между сигналами тока и напряжения.

С учетом (1) получим выражения для определения эффективной мощности на каждом элементе ЭМС:

– на источнике питания

$$P_{ei} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_i^2(t) dt} = \sqrt{P_{0i}^2 + \frac{P_{ai}^2}{2} + \frac{P_{bi}^2}{2}};$$

– на активном сопротивлении

$$P_{eR} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_R^2(t) dt} = \sqrt{P_{0R}^2 + \frac{P_{aR}^2}{2} + \frac{P_{bR}^2}{2}};$$

– на индуктивности

$$P_{eL} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_L^2(t) dt} = \sqrt{\frac{P_{2aL}^2}{2} + \frac{P_{2bL}^2}{2}};$$

где  $P_0, P_a, P_b$  – нулевая, косинусная и синусная составляющие мгновенной мощности на каждом эле-

менте.

Суммарная эффективная мощность потребителя

$$P_{e\ pot} = P_{e\ R} + P_{e\ L}. \quad (5)$$

Для электрической цепи с параметрами  $I_m = 16\ A$ ;

$U_n = 380\ B$ ;  $\varphi = 1,5\ rad$ ;  $I_{Ia} = I_m \cos(\varphi) = 1,13\ A$ ;  
 $I_{Ib} = I_m \sin(\varphi) = 15,9\ A$ ;  $\Omega = 314\ rad / c$ ;  $R=0,731\ \Omega$ ;  
 $L=0,065\ Гн$  в табл. 1 приведены значения эффективных мощностей для каждого элемента электрической цепи.

Таблица 1 – Эффективная мощность на каждом элементе электрической цепи

Эффективная мощность источника питания $P_{ei}$ , ВА	Эффективная мощность элементов цепи, ВА	
	$P_{eR}$	$P_{eL}$
1762	155,5	1852

Анализ полученных значений показывает, что выполняется неравенство

$$P_{ei} \neq \sum_{j=1}^J P_{e\ pot}, \quad (6)$$

обусловленное процессами энергообмена в цепи. В системах с активными элементами эффективная мощность источника будет равна эффективной мощности потребителя. Это показывает, что процессы внутреннего энергообмена имеют место только при наличии реактивных элементов в цепи. Данное явление объясняется тем, что при передаче энергии потребителю она превращается из электромагнитной в другой вид энергии, но при наличии реактивных элементов часть ее накапливается емкостными, индуктивными и другими элементами и осуществляется внутренний энергообмен между ними и системой. Сказанное объясняет неравенство (6) и указывает на необходимость разделения всех энергообменных процессов на внешние и внутренние, а также их рассмотрение при наличии нелинейных элементов в электрической цепи.

Удобным аппаратом для анализа энергопроцессов электрических цепей с нелинейностью является энергетический метод, который основан на понятии мгновенной мощности, что позволяет отдельно рассматривать мощности гармоник, определяющих особенности преобразования энергии при полигармонических сигналах, и дать количественную оценку процессам преобразования энергии.

Использование баланса мощностей на отдельных гармониках обусловлено тем, что при таком рассмотрении количество уравнений баланса будет достаточным при любом количестве неизвестных.

Ранее указано, что энергетический метод позволяет не только определить необходимые параметры цепи, но и проанализировать внутренние процессы энергообмена, обусловленные наличием нелинейных элементов, сформулировать показатели оценки качества преобразования энергии, показать преобразования мощности в нелинейном элементе: ее потребление, рассеивание и генерацию. Рассмотрим вышеуказанные положения на примере нелинейной индуктивности.

При рассмотрении кривой намагничивания стали для асинхронных двигателей появляется необходимость определения ее нелинейной зависимости для

оценки показателей, характеризующих степень насыщения.

Характеристика нелинейной индуктивности в данном случае описывается зависимостью потокосцепления от тока намагничивания:

$$\Psi(I) = a_1 I_1 + a_3 I_3^3 + a_5 I_5^5 + \dots + a_n I_n^n, \quad (7)$$

где  $a_1, a_3, a_n$  – коэффициенты аппроксимации значения тока в точке аппроксимации.

Как видим, такая зависимость является нелинейной. Для решения поставленной задачи перейдем от нелинейной электрической цепи к цепи с переменными во времени параметрами:

$$U(t) = I(t)R + \frac{d\Psi(t)}{dt}.$$

В результате дифференцирования потокосцепления

$$\frac{d\Psi(I)}{dI} = a_1 + 3a_3 I_3^2 + 5a_5 I_5^4 + \dots + na_n I_n^{n-1} = L(I).$$

Зависимость  $L(t)$  легко получить, подставив в  $L(I)$  значения тока, протекающего по обмотке:

$$I(t) = \sum (I_{ma} \cos(n\Omega t) + I_{mb} \sin(n\Omega t)) = \sum (\dot{I}_{ma} + \dot{I}_{mb}), \quad (8)$$

где  $\dot{I}_{ma} = I_{ma} \cos(m\Omega t)$ ;  $\dot{I}_{mb} = I_{mb} \sin(m\Omega t)$ .

Такой прием позволяет упростить выражения, при этом следует помнить, что символ  $\dot{I}_{ma}, \dot{I}_{mb}, \dot{I}_{na}, \dot{I}_{nb}$  и т.д. означают вектор, меняющийся с частотой  $m\Omega$  или  $n\Omega$ .

Анализируя  $L(t)$ , можно отметить, что в случае насыщенной стали коэффициенты  $a_1, a_3, a_n = 0$ .

Рассмотрим кривую намагничивания без потерь в стали. Зависимость индуктивности от времени будет

$$L(t) = L_0 + \sum a_i \cos(\Omega_i t), \quad (9)$$

где  $L_0$  – постоянная составляющая индуктивности;  $a_i$  – коэффициент аппроксимации;  $\Omega_i$  – частота изменения индуктивности.

Такое представление зависимости (9) позволяет рассматривать параметр  $L(t)$ , изменяющийся в зависимости от тока или времени или обоих параметров одновременно, т.е. изменение индуктивности осуществляется принудительно – механическим путем. Результаты, полученные при этом, могут быть разнообразны. Часть из них представляет особый интерес, например, распределение мощности по каналам управления в случае механического изменения мощности.

В нашем случае оправдано рассмотрение изменения  $L(t)$  под действием тока  $I(t)$ . При насыщении стали ток, протекающий по обмоткам, становится несинусоидальным даже при синусоидальном напряжении, это приводит к появлению высших гармоник. Поэтому определение параметров нелинейной индуктивности в данном случае является важной составляющей процессов формирования потерь в стали, что будет показано в следующих работах.

В качестве примера рассмотрим систему, содержащую нелинейную индуктивность, описанную зависимостью

$$L(t) = L_0 + \sum (L_{Ia} \cos(k\Omega t) + L_{Ib} \sin(k\Omega t)), \quad (10)$$

где  $\kappa$  – номер гармоники;  $a, b$  – косинусные и синусные составляющие соответственно.

На рис. 1 представлена электрическая схема, где

нелинейная индуктивность выражена постоянной  $L_0$  и переменной  $L(I)$  составляющими.

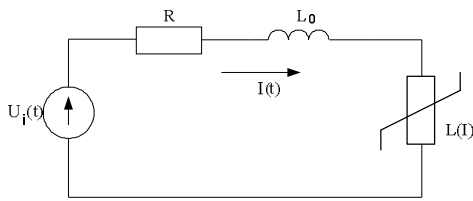


Рисунок 1 – Электрическая схема замещения цепи с нелинейной индуктивностью

Для рассмотрения энергопроцессов непосредственно на нелинейной составляющей индуктивности справедлива такая схема замещения, в которой выделяется линейная часть (не меняющаяся во времени), а также совокупность ЭДС переменного тока с кратными частотами (рис. 2) [3]. При таком рассмотрении имеется возможность объяснить механизм преобразования энергии, т.к. активная мощность потребляется только в составе одночастотных компонент, например,  $U_1(t)$  и  $I_1(t)$ , а высокочастотная составляющая тока вызвана непосредственно процессом преобразования энергии в нелинейном элементе.

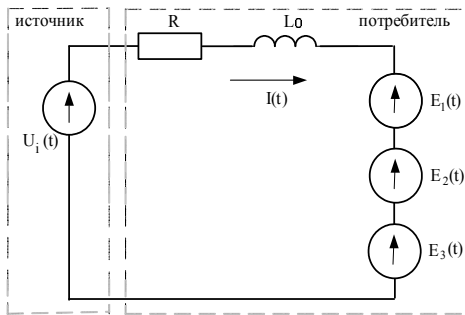


Рисунок 2 – Преобразованная схема замещения электрической цепи с нелинейностью

В соответствии с  $L(t)$  запишем выражение для ЭДС, наведенной в обмотке насыщаемой индуктивности:

$$E(t) = L_0 \frac{dI(t)}{dt} + \frac{d}{dt}(L(t)I(t)) = E_{1a} \cos(\Omega t) + E_{1b} \sin(\Omega t) + \dots + E_{ma} \cos(m\Omega t) + E_{mb} \sin(m\Omega t) = \dot{E}_{1a} + \dot{E}_{1b} + \dots + \dot{E}_{ma} + \dot{E}_{mb},$$

где  $E_{ma}, E_{mb}$  – эквивалентные ЭДС косинусных и синусных компонент каждой гармоники, описывающие процессы, происходящие на нелинейной индуктивности;  $\dot{E}_{1a} = E_{1a} \cos(\Omega t)$ ;  $\dot{E}_{1b} = E_{1b} \sin(\Omega t)$ ;

$$\dot{E}_{ma} = E_{ma} \cos(m\Omega t); \dot{E}_{mb} = E_{mb} \sin(m\Omega t).$$

Примем, что сигналы напряжения, тока и ЭДС описываются зависимостями:

$$I(t) = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b} + \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{3b} + \dot{I}_{5a} + \dot{I}_{5b};$$

$$E_1(t) = \dot{E}_{1a} + \dot{E}_{1b}; E_3(t) = \dot{E}_{3a} + \dot{E}_{3b};$$

$$E_5(t) = \dot{E}_{5a} + \dot{E}_{5b}.$$

Тогда выражения для мгновенной мощности на каждом элементе:

– на выходе источника питания

$$P_i(t) = U_i(t)I(t) = (\dot{U}_{1a} + \dot{U}_{1b}) \times (\dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b} + \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{3b} + \dot{I}_{5a} + \dot{I}_{5b});$$

– на активном сопротивлении

$$P_R(t) = U_R(t)I(t) = RI^2(t) = R(\dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b} + \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{3b} + \dot{I}_{5a} + \dot{I}_{5b})^2;$$

– на индуктивности

$$P_L(t) = U_L(t)I(t),$$

где  $U_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt}$ ;

– для ЭДС потребителя

$$P_{E1}(t) = E_1(t)I(t) = (\dot{E}_{1a} + \dot{E}_{1b}) \times (\dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b} + \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{3b} + \dot{I}_{5a} + \dot{I}_{5b});$$

$$P_{E2}(t) = E_2(t)I(t) = (\dot{E}_{3a} + \dot{E}_{3b}) \times (\dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b} + \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{3b} + \dot{I}_{5a} + \dot{I}_{5b});$$

$$P_{E3}(t) = E_3(t)I(t) = (\dot{E}_{5a} + \dot{E}_{5b}) \times (\dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b} + \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{3b} + \dot{I}_{5a} + \dot{I}_{5b}).$$

После преобразований соответствующих компонент получим уравнения мгновенной мощности, включающие постоянные и знакопеременные составляющие.

Для каждой из гармоник составляющая мгновенной мощности источника будет равна сумме составляющих мгновенной мощности на всех элементах схемы замещения. Согласно принципу суперпозиции, система идентификационных уравнений может быть получена из выражения [9]

$$P_i(t) = I^2(t)R + L_0 \frac{dI(t)}{dt}I(t) + E(t)I(t).$$

В результате решения системы предоставляется возможность получения следующих параметров:  $E_{1a}, E_{1b}, E_{3a}, E_{3b}, E_{5a}, E_{5b}, L_0$ .

Следует отметить, что режим работы нелинейности – это режим преобразователя энергии, в данном случае преобразователя частоты. Если потери в стали равны нулю ( $P_0 = 0$ ), то преобразователь частоты выступает как идеальный преобразователь энергии. Другой вывод заключается в невозможности схемного представления преобразователя, т.е. схемы его включения в сеть. Из сети электрической цепью, включающей сопротивление и нелинейную индуктивность, потребляется активная мощность на гармониках напряжения источника питания.

Механизм распределения энергии в цепи понятен из векторных диаграмм (рис. 3).

Диаграмма на рис. 3,а показывает общую картину процессов для случая, когда индуктивность линейная, т.е. когда насыщение в стали отсутствует или не учитывается ввиду незначительности значения степени насыщения. Диаграмма на рис. 3,б отличается тем, что индуктивная часть падения напряжения  $I_1L_0$  дополнена э.д.с.  $E_{n1}$ , которая получается вследствие функционирования механизма преобразования частоты в нелинейном элементе. Часть энергии в форме произведения  $E_{n1}I_1$  – энергия и мощность на первой гармонике, берущаяся из сети во внутреннюю структуру преобразователя частоты.

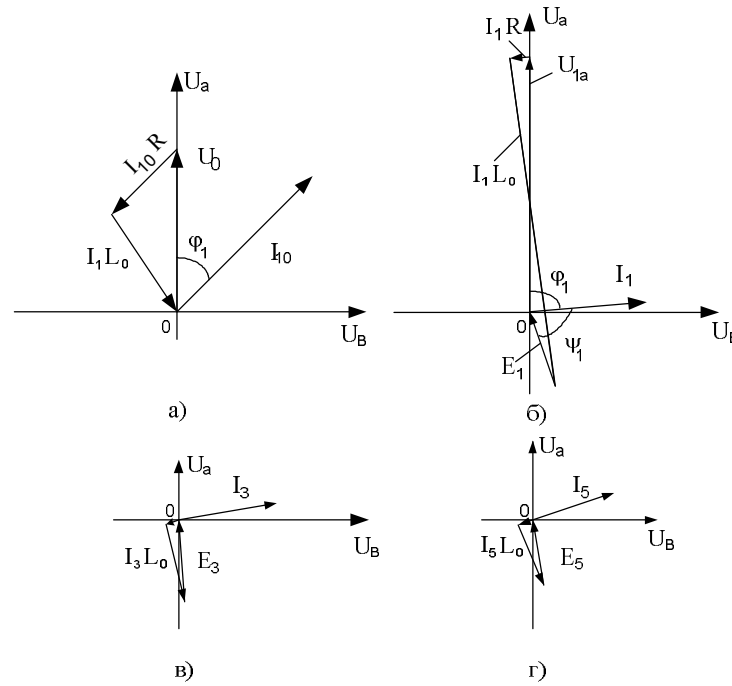


Рисунок 3 – Векторные диаграммы первых гармоник напряжения и токов в RL цепи с нелинейной индуктивностью

Произведение  $E_{n1}I_1 \cos \psi_1$  определяет мощность, берущуюся из сети и преобразуемую в мощность гармоник. На рис. 3 представлены векторные диаграммы первой, третьей и пятой гармоник (рис. 3,б–г); векторные диаграммы для других гармоник будут другой формы, т.к. каждая из гармоник имеет свою частоту. Суммарная мощность гармоник после преобразования рассеивается на активном сопротивлении в виде активной мощности.

На рис. 3,в,г показано, что когда на высших гармониках напряжение питания отсутствует, то э.д.с. нелинейности будет генерироваться и рассеиваться во внешней цепи.

Как известно, наличие нелинейной индуктивности  $L(t)$ , в отличие от линейной  $L$ , характеризуется увеличением токов, что, в свою очередь, влияет на мощность источника питания. Для рассмотрения энергопроцессов в цепи, содержащей нелинейность, покажем изменение активной, реактивной, полной и эффективной мощностей на источнике с учетом линейной и нелинейной нагрузки при изменении напряжения. Данные анализа представлены в табл. 2.

Исследования выполнены с использованием таких выражений:

– для активной мощности

$$P = UI_1 \cos \varphi_1,$$

где  $I_1$  – ток на первой гармонике;

$$\cos \varphi_1 = \frac{R}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}};$$

– для реактивной мощности

$$Q = UI_1 \sin \varphi_1,$$

$$\text{где } \sin \varphi_1 = \frac{\omega L}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}};$$

– для полной мощности на линейной и нелиней-

ной индуктивности

$$S_L = UI; S_{L(t)} = UI_e,$$

где  $I$  – значение тока в цепи при линейной индуктив-

ности;  $I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt}$  – эффективное значение тока нелинейной индуктивности.

Таблица 2 – Параметры цепи при линейной и нелинейной индуктивности

$U, B$	100	150	220	300
$I_1, A$	0,4	0,7	1,5	2,07
$I_3, A$	0,05	0,1	0,3	0,5
$I_5, A$	0,04	0,06	0,08	0,09
$L_0, Гн$	1,2	1,1	0,9	0,7
$P_L, BA$	32	88	214	485
$P_{L(t)}, BA$	39	109	301	660
$Q_L, BAP$	52	95	190	383
$Q_{L(t)}, BAP$	48	111	220	480
$S_L, BA$	64	150	352	720
$S_{L(t)}, BA$	87	154	375	742
$P_{eL(t)}, BA$	53	94	239	846
$I_{eL(t)}, A$	0,64	1	1,6	2,4
$k_p$	0,25	0,2	0,13	0,06
$k_i$	0,06	0,11	0,18	0,23

Коэффициенты искажения мощности и тока:

$$k_p = \frac{\sqrt{\sum_n^N P_n^2}}{P_1}; k_i = \frac{\sqrt{\sum_n^N I_n^2}}{I_1},$$

где  $P_n, I_n$  – мощность и ток высших гармоник;

$P_1, I_1$  – значения мощности и тока первой гармоники.

Для получения расчетных данных была составлена модель, которая при известных параметрах насыщения позволяет получить значения тока при любом напряжении. Таким образом, расчет выполнен для угловой частоты  $\omega = 100 \text{ c}^{-1}, T = 0,062 \text{ c}$ .

В задачах идентификации нелинейностей использование энергетического метода позволяет разделить ЭМС на отдельные звенья и упростить анализ энергопроцессов путем составления идентификационных уравнений для каждого звена, причем результат на первом из них является исходным материалом для второго и т.д. Полученный результат подтверждает сделанный вывод, делающий энергетический метод мобильным средством анализа процессов и решения идентификационных задач.

Выполненный анализ позволил изучить механизм преобразования мощности на нелинейном элементе. При этом показаны возможности применения принципа суперпозиции на составляющих мощности для

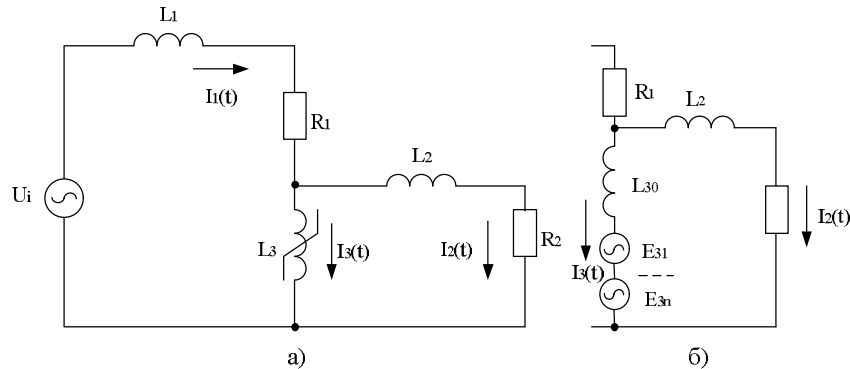


Рисунок 4 – Электрическая схема а) потребителя сложной структуры; б) схема замещения нелинейности  $L_3$

Воспользовавшись ранее изложенным примером, заменим нелинейность индуктивностью  $L_{30}$  и эквивалентными э.д.с.  $E_{31}, \dots, E_{3n}$ . Источник питания, как и в предыдущем случае, – переменное напряжение синусоидальной формы. В соответствии со сказанным можно считать, что токи  $I_1, I_2, I_3$  имеют несинусоидальный характер:

$$I_1(t) = \sum_1^M I_{1m} \cos(m\Omega t - \varphi_{m1}) = \sum_1^M (I_{1a} - I_{1b});$$

$$I_2(t) = \sum_1^M I_{2m} \cos(m\Omega t - \varphi_{m2}) = \sum_1^M (I_{2a} - I_{2b});$$

$$I_3(t) = \sum_1^M I_{3m} \cos(m\Omega t - \varphi_{m3}) = \sum_1^M (I_{3a} - I_{3b}).$$

Анализ режима энергопреобразований далее осуществляется с учетом следующих особенностей:

- число неизвестных определяется, исходя из количества э.д.с. в схеме замещения, числа элементов в ней ( $L_1, R_1, L_2, R_2, L_0, E_{1a}, E_{1b}, \dots, E_{na}, E_{nb}$ ), тока одного из контуров ( $I_{2a}, I_{2b}, \dots, I_{ma}, I_{mb}$ );

- число идентификационных уравнений включает  $m$  уравнений баланса активной мощности (одно уравнение на гармонику тока);  $m+1$  косинусных компонент уравнений баланса мгновенной мощности;  $m+1$  синусных компонент уравнений баланса мгновенной мощности.

разных гармоник, что подтверждается векторными диаграммами. Показано увеличение составляющих тока и мощности, снижение индуктивности  $L_0$  по мере вхождения в зону насыщения.

Коэффициент искажения мощности, равный отношению квадратов высших гармоник к мощности первой гармоники, снижается за счет опережающего роста первой гармоники тока источника питания. При этом коэффициент искажения тока источника растет по мере роста насыщения индуктивности.

Энергетический метод применим для сложных задач с разветвленными контурами, с несколькими нелинейностями и др. При этом координатные составляющие мощности гармоник разных элементов складываются арифметически независимо от конфигурации схемы замещения.

Рассмотрим более сложный случай – разветвленную цепь (рис. 4) с нелинейной индуктивностью  $L_3$ .

Энергопреобразования, определяющие спектр гармоник мощности, относятся к первой гармонике напряжения и  $m$  гармоникам тока, частоты которых кратны частоте сети.

Второй этап анализа, связанного с идентификацией нелинейности, сводится к вычислению коэффициентов, определяющих характер нелинейности. На этом вопросе, а также ряде других, возникающих в соответствии со спецификой нелинейности (или ряде нелинейностей в случае сложных расчетных схем), далее не останавливаемся, т.к. часть из них изложена в [10].

**ВЫВОДЫ.** Идентификация нелинейностей энергетическим методом представляет собой специфическую задачу, базирующуюся на системе идентификационных уравнений – совокупности уравнений баланса составляющих мощности по каждой гармонике между источником питания и элементами схемы замещения потребителя.

Идентификацию параметров нелинейностей предпочтительно осуществлять в два этапа:

- на первом составляется система идентификационных уравнений для определения соответствующих э.д.с. схемы замещения;

- на втором составляется другая схема замещения в соответствии с уравнениями энергопреобразований в нелинейной индуктивности для определения коэффициентов, входящих в зависимость, описывающую нелинейность.

Учет потерь в нелинейности может быть осуществлен путем учета сдвига во времени выходной величины нелинейного элемента относительно входной. При несинусоидальном напряжении питания система идентификации нелинейностей осуществляется в изложенном в работе порядке с учетом гармонического состава напряжения на входе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крогерис А.Ф. Мощность переменного тока. – Рига: Физико-энергетический институт, 1993. – 294 с.
2. Родькин Д.И. О несоответствии некоторых положений теории энергопроцессов теореме Телледжена // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 127–135.
3. Родькин Д.И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ 2007. – Вип. 3/2007 (44), ч. 1. – С. 66–77.
4. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. Часть 2. Определение и использование показателей энергетических режимов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – 2005. – Вип. 3 (32). – С. 106–115.
5. Akagi H., Watanabe M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.
6. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Связь, 1972. – 326 с.
7. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 37–41.
8. Зевеке Г.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.
9. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – Вип. 1. – С. 80–85.
10. Родькин Д.И., Мосюндз Д.А., Черный А.П., Коренькова Т.В. Расширение возможностей энергетического метода в задачах идентификации нелинейностей электромеханических систем // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 2 (18). – С. 10–17.

#### ENERGY PROCESSES IN ELECTRIC CIRCUITS TAKE INTO ACCOUNT OF NONLINEARITY PARAMETERS IDENTIFICATION WITH ENERGY METHOD

##### D. Mosyundz

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: darya\_mosyundz@mail.ru

Energy method in the problem of nonlinear inductance parameter identification have been shown. This approach (based on the balance of power of the elements of the source and the consumer at each harmonic) allows getting the required number of equations to determine the parameters. The possibilities of the energy method in the analysis of energy processes in nonlinear circuits have been shown. Represented a mathematical apparatus allows the basic properties of nonlinearity and simplify the determine necessary the coefficients. The method for define the parameters of the nonlinear inductance taking into account losses in the steel have been shown analytically.

**Key words:** energy method, energy diagnostics, identification, nonlinear inductance.

#### REFERENCES

1. Krogeris A.F. *Power of alternating current*. – Riga: Physical-energy university, 1993. – 294 p. [in Russian]
2. Rodkin D.I. On the inconsistency some theory of the energy processes to Telledzhen's theorem // *Problems of automated electric. Theory and practice*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2010. – № 28. – PP. 127–135. [in Russian]
3. Rodkin D.I. Balance of components of the instantaneous power of poly harmonic signals // *Bulletin of Kremenchuk State Polytechnic University*. – Kremenchuk: KSPU, 2007. – Iss. 3/2007 (44), part 1. – PP. 66–77. [in Russian]
4. Rodkin D.I. Comments on the theory of poly harmonic energy processes signals. Part 2. The definition and use of indicators of energy modes // *Bulletin of Kremenchuk State Polytechnic University* – Kremenchuk: KSPU, 2005. – Iss. 3 (32). – PP. 106–115. [in Russian]
5. Akagi H., Watanabe M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.
6. Andreev V.S. *The theory of nonlinear circuits*. – M: Svyaz, 1972. – 326 p. [in Russian]
7. Rodkin D.I., Byalobrzhesky A.V., Lomonos A.I. Indicators energy process in circuit with poly harmonic voltage and current // *Electrotechnology*. – 2004. – № 6. – PP. 37–41. [in Russian]
8. Zeveke G.V. *Basics of circuit theory*. – M.: Energoatomizdat, 1989. – 527 p. [in Russian]
9. Rodkin D.I. The principle of superposition in the processes of energy conversion // *Bulletin of Kremenchuk State Polytechnic University*. – 2003. – Iss. 1. – PP. 80–85. [in Russian]
10. Rodkin D.I., Mosyundz D.A., Cherniy A.P., Korenkova T.V. Enhancement capabilities of energy method in task of identification nonlinearity of electromechanical system // *Electromechanical and energy saving systems*. – 2012. – Iss. 2 (18). – PP. 10–17. [in Russian]

Стаття надійшла 19.08.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Чермалихом В.М.