

УДК 681.511.4.001.3:621.3.052:005.001.76

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д. И. Родькин, Д. А. Мосюндз, А. П. Черный, Т. В. Коренькова

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: ieesu@kdu.edu.ua

Представлено обоснование необходимости и важности анализа систем и устройств с нелинейными характеристиками. Предложен математический аппарат для определения параметров нелинейных электромеханических систем на основе энергетического баланса мгновенной мощности по каждой гармонике. Показано, что данный подход позволяет получить достаточное количество идентификационных уравнений для определения электромагнитных параметров систем с учетом нелинейностей. Определены параметры насыщения и индуктивности, а также сопротивление электрической цепи.

Ключевые слова: метод мгновенной мощности, энергодиагностика, идентификация, нелинейная индуктивность.

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Д. Й. Родькін, Д. А. Мосюндз, О. П. Чорний, Т. В. Коренькова

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ieesu@kdu.edu.ua

Надано обґрунтування необхідності та важливості аналізу систем та пристроїв з нелінійними характеристиками. Запропоновано математичний апарат для розрахунку параметрів нелінійних електромеханічних систем на основі енергетичного балансу миттєвої потужності за кожною гармонікою. Показано, що даний підхід дозволяє отримати достатню кількість ідентифікаційних рівнянь для визначення електромагнітних параметрів систем з урахуванням нелінійностей. Розраховано параметри насичення та індуктивності, а також опір електричного контуру.

Ключові слова: метод миттєвої потужності, енергодіагностика, ідентифікація, нелінійна індуктивність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последнее время возрос интерес к процессам преобразования энергии в электромеханических системах (ЭМС), что обусловлено интенсивным развитием технических возможностей микропроцессорных систем управления и обработки сигналов. Для анализа энергетических процессов в электротехнике широко используются понятия активной, реактивной и полной мощности. Однако в ряде исследований [1] показано, что такой подход не соответствует закону сохранения энергии. В этой связи оправданным является использование метода мгновенной мощности, математический аппарат которого позволяет дать оценку энергопроцессам и эффективности использования энергии потребителем, поэтому закономерности формирования мгновенной мощности и ее составляющих представляют собой особый интерес при рассмотрении процессов преобразования энергии в ЭМС.

Существующие методы анализа энергопроцессов направлены на их рассмотрение предпочтительно на выходе источника. Однако для энергоэффективного управления и повышения качества преобразования энергии актуальным является решение задачи учета энергообмена между источником и потребителем путем оценки мгновенных значений сигналов, которые отражают физический процесс в каждый момент времени.

Теория мгновенной мощности позволяет получить три системы баланса составляющих мгновенной мощности: по постоянной и двум знакопеременным составляющим – косинусной и синусной на соответствующих частотах [2]. Это дает возможность составить достаточное число идентификационных уравнений для определения электромагнитных параметров ЭМС. Уравнения электрического равновесия для каж-

дой из гармоник, составленные на базе принципа суперпозиции и закона сохранения энергии [3], служат основой для комплекса идентификационных уравнений при решении задач диагностического характера в ЭМС. Однако в ряде случаев процесс идентификации усложняется наличием нелинейности в цепи. Уравнения, описывающие процессы преобразования энергии, получаются достаточно сложными и трудоемкими в решении. В таких случаях необходим другой подход для решения таких систем. Одним из таких способов является энергетический метод на основе теоремы компенсации [4].

В настоящее время одним из важных направлений в электромеханике является поиск путей, позволяющих с большой точностью описывать процессы, вызванные наличием нелинейных элементов в системе без существенных потерь информации в отношении электромеханических и энергетических свойств нелинейных объектов.

Исследования для решения вышеуказанной задачи можно условно разделить на три направления:

- исследования особенностей поведения ЭМС с явно выраженными нелинейными характеристиками тех или иных элементов, входящих в систему;
- исследования, связанные с энергетическими процессами, происходящими в нелинейных цепях;
- идентификация нелинейностей в ЭМС по результатам экспериментальных данных, что позволит наиболее точно и объективно интерпретировать физические процессы и создать математические модели реальных объектов.

Ввиду отсутствия простого и эффективного метода анализа систем и устройств с нелинейными характеристиками. Целью работы является создание математического аппарата, который позволит получить

необходимую точность оценки и анализ особенностей физических процессов в нелинейных цепях.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Для разработки, исследования или эксплуатации различных электромеханических устройств необходимо прежде всего знать процессы, происходящие в электрических цепях при различных условиях, а также законы, которым подчиняются эти процессы. Объекты, из которых могут состоять такие устройства, обладают бесконечным множеством свойств и характеризуются большим количеством связей как в самом объекте, так и вне его [5]. Учет всех особенностей различных элементов является основным условием при создании математического аппарата для их описания, наиболее сложным и ответственным этапом применения которого является рассмотрение физических процессов в электрических цепях.

Существует ряд общих требований, которые предъявляются к математическим моделям: достаточная точность, информативность и простота. Обеспечить достаточную точность – значит, при математическом описании реального объекта учесть все его существенные свойства и связи. Решение этого вопроса непосредственно связано с информативностью полученных данных, т.к., учитывая все свойства объектов, можно получить новые характеристики и новые знания о них, которые в ряде случаев значительно отличаются от традиционных. Также все физические процессы, в электромеханике в частности, подчиняются основному закону природы – закону сохранения энергии. Таким образом, это основной критерий объективности и возможности применения (универсальности) любого математического аппарата, описывающего процессы передачи и преобразования энергии.

Для оценки внутренних процессов в электрических цепях математический аппарат должен учитывать основные свойства составляющих этих цепей. Фундаментом математических теорий и систем является теория множеств [5]. Эта теория применима к очень многим областям знаний, поскольку ее элементами могут быть самые разнообразные объекты: атомы, числа, функции, точки, углы и т.д. Язык теории множеств включает большое число различных понятий и связей между ними, что позволяет изучать множества любой природы.

Получение новых данных об исследуемых процессах или объектах является неотъемлемой составляющей при идентификации параметров электромеханических систем любой природы, при оценке качественных и количественных показателей преобразования энергии между источником и потребителем с нелинейной нагрузкой, определении параметров и характеристик эксплуатируемого электрооборудования и т.д.

Рассмотрим возможности использования мгновенной мощности в задачах идентификации определения параметров и характеристики внутренних процессов электрических цепей.

Анализ литературы показал, что основными методами расчета электрических цепей являются комплексный, графический, энергетический, метод наложения и контурных токов [6]. Однако, когда цепь включает нелинейность, количество способов сни-

жается из-за значительного увеличения количества неизвестных.

Наиболее существенная особенность расчета нелинейных цепей при переменных токах заключается в необходимости учета в общем случае динамических свойств нелинейных элементов. Другой важной особенностью нелинейных элементов в цепи переменного тока является вызываемое ими появление высших гармоник даже при наличии в цепи только источников синусоидального тока и напряжения [7].

Известные методы базируются на линеаризации нелинейных объектов или их аппроксимации простыми в математическом отношении зависимостями, что сказывается на точности результатов. При этом энергетическая сторона вопроса практически не рассматривается, хотя одна из форм проявления нелинейностей в процессах преобразования энергии заключается в существенном усложнении энергетических процессов, а вследствие этого и ухудшении энергетических показателей. Это подтверждает появление искажений напряжения и тока в сетях с синусоидальным питанием и нелинейной нагрузкой.

Основная сложность при анализе нелинейных цепей, как полагают исследователи, заключается в невозможности использования принципа суперпозиции. Этим обусловлено незначительное использование энергетических методов при оценке преобразования энергии и определении параметров нелинейностей.

Такой вывод объясняется тем, что теория энергопроцессов, базирующаяся, в частности, на интегральных методах анализа, не в состоянии объяснить целый ряд явлений, имеющих место при процессах преобразования энергии. Использование интегральных методов [8], как указывалось в ряде исследований, приводит к потере информации и к тому результату, который не позволяет использовать энергетические методы при анализе цепей с нелинейностями.

Энергетический метод полностью основан на понятии мгновенной мощности, что позволяет отдельно рассматривать мощности гармоник, определяющие особенности преобразования энергии при полигармонических сигналах, и дать количественную оценку процессам преобразования энергии. Основными преимуществами энергетического метода является то, что в его основу положен закон сохранения энергии и данный подход применим для определения любых параметров электрической цепи.

При наличии составляющих (гармоник) в кривых напряжения и тока их можно интерпретировать как множества, представленные в форме рядов

$$\{U(t)\} = \sum U_n; \{I(t)\} = \sum I_m. \quad (1)$$

Учитывая вышесказанное, мощность представляет собой произведение множеств напряжения и тока и также является множеством:

$$\{P(t)\} = \{U(t)\}\{I(t)\} = \sum P_k. \quad (2)$$

Интегральные оценки (среднее, среднеквадратичное значения) определяют соответствующие значения свернутых множеств. Сворачивание множеств дает положительный результат – какую-то оценку энерго-

процесса, но мешает возможности получения более полных характеристик, присущих анализируемым множествам. Сказанное указывает на необъективность количественного анализа процессов, определяющихся множествами $\{U(t)\}$, $\{I(t)\}$ и $\{P(t)\}$, включая их взаимосвязи в форме уравнений баланса на каждой из составляющих компонент множеств. В данном случае речь идет об уравнениях баланса мгновенной мощности на всех возможных гармониках.

Ранее отмечалось, что в исследованиях мало внимания уделялось нелинейному элементу как преобразователю частоты. Доказано, что при работе нелинейного элемента в цепи переменного тока в последнем протекает ток, состоящий из бесконечного числа гармонических, кратных частоте сети, причем отдельные гармоники пренебрежительно малы, чем и объясняется тот факт, что при анализе берется конечное число гармонических:

$$I(t) = \sum_{m=1}^{m=k} I_m \cos(m\Omega_m t - \phi_m) = \sum_{m=1}^{m=k} (I_{ma} \cos(m\Omega_m t) + I_{mb} \sin(m\Omega_m t)), \quad (3)$$

где I_m – амплитудное значение тока на m -ой гармонике; Ω_m – угловая частота m -ой гармоники; ϕ_m – угол сдвига между током и напряжением; m – номер гармоники.

С учетом того, что каждая гармоника тока порождается соответствующей гармоникой нелинейной индуктивности, выражение индуктивности при прохождении по ней тока $I(t)$ принимает вид

$$L(t) = L_0 + \sum (L_{ka} \cos(k\Omega t) + L_{kb} \sin(k\Omega t)), \quad (4)$$

где L_0 – постоянная составляющая индуктивности; L_{ka} , L_{kb} – косинусная и синусная составляющие нелинейности.

Сказанное иллюстрируется очевидной, не требующей пояснения схемой замещения (рис. 1), где в качестве нелинейного элемента взята индуктивность с насыщением $L(I)$ (рис. 2).

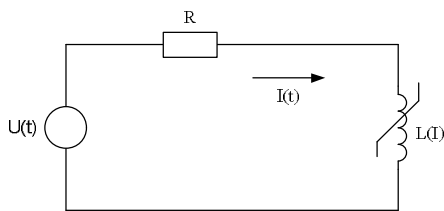


Рисунок 1 – Схема замещения ЭМС

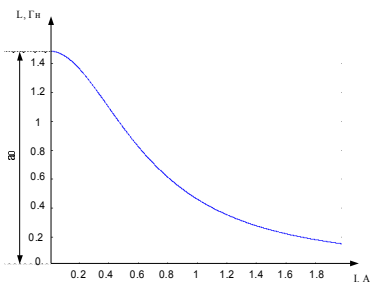


Рисунок 2 – Кривая изменения насыщения индуктивности от тока

Учитывая, что параметры исходной кривой намагничивания нам известны, получить параметры тока и напряжения можно путем моделирования. Используя математические преобразования, данные кривые будут представлены тригонометрическими рядами, что необходимо для дальнейшей работы.

Таким образом, проверить предложенный математический аппарат для определения параметров нелинейности можно, используя данные, полученные путем моделирования.

Кривая насыщения индуктивности описывается зависимостью

$$L(I) = a_0 + a_2 I^2 + a_4 I^4, \quad (5)$$

где a_0 , a_2 , a_4 – коэффициенты аппроксимации.

Для определения кривой $L(t)$ воспользоваться зависимостью (5) невозможно. Получение зависимости $L(t)$ аналитическим путем в литературе не обсуждалось, хотя вопрос представляет непосредственный интерес. Основы применения энергетического метода в подобных задачах изложены в [9].

Для того, чтобы получить зависимость $L(t)$, необходимо подставить значения $I(t)$ в $L(I)$. При этом коэффициенты a_0 , a_2 , a_4 являются неизвестными. Зависимость $I(t)$ представляет собой совокупность тригонометрических функций, которые при возведении в четную степень дают постоянную и знакопеременную составляющие. Таким образом, выражение для $L(t)$ примет вид:

$$L(t) = a_0 + a_2 I^2(t) + a_4 I^4(t), \quad (6)$$

где коэффициенты a_0 , a_2 , a_4 представляют собой сложные зависимости, полученные в результате частотного преобразования тригонометрической функции, описывающей ток.

Рассмотрим механизм формирования описанных выше коэффициентов на примере. В нашем случае для анализа взята типовая симметричная кривая намагничивания, для которой характерно изменение индуктивности с двойной частотой по сравнению с частотами компонент тока, определяющих процесс перемагничивания материала. Пусть параметры схемы замещения таковы: напряжение питания $U(t) = U_{1a} \cos(\Omega t)$; ток в цепи

$$I(t) = \sum_{m=1}^{m=k} (I_{ma} \cos(m\Omega_m t) + I_{mb} \sin(m\Omega_m t)).$$

Тогда, с учетом вышесказанного, выражение для нелинейной индуктивности примет вид:

$$L(t) = L_0 + a_2 \left(\sum_{m=1}^{m=k} (I_{ma} \cos(m\Omega_m t) + I_{mb} \sin(m\Omega_m t)) \right)^2 + a_4 \left(\sum_{m=1}^{m=k} (I_{ma} \cos(m\Omega_m t) + I_{mb} \sin(m\Omega_m t)) \right)^4,$$

где $L_0 = a_0 + f(a_2; a_4; I_1; I_3; \dots; I_m)$.

Анализ полученной зависимости индуктивности показывает, что постоянная составляющая L_0 является функцией, которая включает в себя постоянную составляющую насыщения индуктивности a_0 и функцию переменных составляющих, полученных путем преобразования тригонометрического ряда

тока, что, как известно, приводит к появлению постоянных составляющих.

Анализ литературы [7, 10] показал, что исследования подобного рода ранее не проводились и такой подход для описания кривой насыщения индуктивности рассматривается впервые. Основной особенностью данного метода является возможность получения кривой $L(t)$ через параметры насыщения, что значительно упрощает расчет и дает возможность одновременно получить параметры и нелинейности, и насыщения. Наряду с вышеописанными неизвестными могут быть определены любые параметры ЭМС, что будет показано далее в работе.

При рассмотрении процессов с нелинейными элементами традиционными методами, в частности, с использованием закона Кирхгофа, число неизвестных, требующих определения, превышает число возможных уравнений баланса напряжений [6].

Таким образом, для определения параметров воспользуемся энергетическим методом на основе метода мгновенной мощности. Сущность метода заключается в том, что токи и напряжения представлены в форме гармонических функций:

$$I(t) = I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{3a} \cos(3\Omega t) + I_{3b} \sin(3\Omega t) + I_{5a} \cos(5\Omega t) + I_{5b} \sin(5\Omega t); \quad (7)$$

$$U(t) = U_{1a} \cos(\Omega t) + U_{1b} \sin(\Omega t). \quad (8)$$

Тогда мощность на каждом элементе:

– на выходе источника питания

$$P_i(t) = U_i(t)I(t) = (U_{1a} \cos(\Omega t) + U_{1b} \sin(\Omega t)) \times (I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{3a} \cos(3\Omega t) + I_{3b} \sin(3\Omega t) + I_{5a} \cos(5\Omega t) + I_{5b} \sin(5\Omega t)); \quad (9)$$

– на активном сопротивлении

$$P_R(t) = U_R(t)I(t) = RI^2(t) = R(I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{3a} \cos(3\Omega t) + I_{3b} \sin(3\Omega t) + I_{5a} \cos(5\Omega t) + I_{5b} \sin(5\Omega t))^2; \quad (10)$$

– на индуктивности

$$P_L(t) = U_L(t)I(t), \quad (11)$$

где $U_L(t) = L(t) \frac{dI(t)}{dt} + I(t) \frac{dL(t)}{dt}$.

При этом нелинейная индуктивность имеет вид:

$$L(t) = L_0 + a_2 \left(\sum_{m=1}^{m=k} (I_{ma} \cos(m\Omega_m t) + I_{mb} \sin(m\Omega_m t)) \right)^2 + a_4 \left(\sum_{m=1}^{m=k} (I_{ma} \cos(m\Omega_m t) + I_{mb} \sin(m\Omega_m t)) \right)^4, \quad (12)$$

где $L_0 = a_0 + a_2 \left(\sum_{m=1}^M (I_{m0})^2 \right) + a_4 \left(\sum_{m=1}^M (I_{m0})^4 \right)$.

Рассмотрим пример, когда при известном токе и напряжении неизвестными являются сопротивление R и параметры насыщения индуктивности $L(I) - a_0, a_2, a_4$.

Сигналы, описанные методом мгновенной мощности, включают как постоянную, так и знакопеременную составляющие. Такое представление позволяет при известном гармоническом составе напряжения и тока составить систему уравнений по каждой гармонике.

Для составления уравнений используем выражение баланса мгновенной мощности в элементах цепи:

$$P_i(t) = P_R(t) + P_{L(t)}(t). \quad (13)$$

Учитывая, что нелинейная индуктивность выражена через неизвестные параметры насыщения, такой подход позволяет определить не только параметры насыщения, но и параметры нелинейности, что будет показано далее.

Согласно принципу суперпозиции [1], система идентификационных уравнений имеет вид:

$$U_{1a}I_{1a} + U_{1b}I_{1b} = RI_{1a}^2 + RI_{1b}^2 + RI_{3a}^2 + RI_{3b}^2 + RI_{5a}^2 + RI_{5b}^2 + a_2 \left(\sum_{m=1}^M (I_{m0})^2 \right) + a_4 \left(\sum_{m=1}^M (I_{m0})^4 \right);$$

$$U_{1a}I_{1a} + U_{1b}I_{3b} - U_{1b}I_{1b} + U_{1a}I_{3a} = RI_{1a}^2 - RI_{1b}^2 + 2RI_{3a}I_{1a} + 2RI_{5b}I_{3b} + 2RI_{1b}I_{3b} + 2RI_{3a}I_{5a} + a_0 \left(\sum I_{2a} \cos(2\Omega t) \right) + a_2 \left(\sum (I_{2a} \cos(2\Omega t))^2 \right) + a_4 \left(\sum (I_{2a} \cos(2\Omega t))^4 \right);$$

$$U_{1b}I_{1b} + U_{1a}I_{1b} + U_{1a}I_{3b} + U_{1b}I_{3a} = 2RI_{1a}I_{1b} + 2RI_{1b}I_{3a} + 2RI_{5a}I_{3b} + 2RI_{1a}I_{3b} + 2RI_{3a}I_{5b} + a_0 \left(\sum I_{2b} \sin(2\Omega t) \right) + a_2 \left(\sum (I_{2b} \sin(2\Omega t))^2 \right) + a_4 \left(\sum (I_{2b} \sin(2\Omega t))^4 \right);$$

$$-U_{1b}I_{3b} + U_{1a}I_{3a} + U_{1a}I_{5a} + U_{1b}I_{5b} = 2RI_{3a}I_{1a} + 2RI_{5a}I_{1a} - 2RI_{1b}I_{3b} + 2RI_{1b}I_{5b} + a_0 \left(\sum I_{4a} \cos(4\Omega t) \right) + a_2 \left(\sum (I_{4a} \cos(4\Omega t))^2 \right) + a_4 \left(\sum (I_{4a} \cos(4\Omega t))^4 \right).$$

Анализ полученных уравнений показал, что число идентификационных уравнений больше количества параметров схемы замещения, что объясняется формированием составляющих мгновенной мощности путем гармонического анализа произведения исходных сигналов напряжения и тока [11, 12].

Удобным инструментом решения таких систем является прямой метод решения линейных уравнений с помощью определителя Гаусса [13].

В качестве примера рассмотрим электрическую цепь, где напряжение источника питания $U(t) = 220 \cos(\Omega t)$; угловая частота $\Omega = 100 \text{ c}^{-1}$; ток в цепи включает 1, 3, 5 гармоники:

$$I(t) = 1,37 \cos(\Omega t) - 1,01 \sin(\Omega t) + 0,08 \cos(3\Omega t) - 0,3 \sin(3\Omega t) + 0,017 \cos(5\Omega t) - 0,085 \sin(5\Omega t). \quad (14)$$

На рис. 3 представлены кривые тока и напряжения.

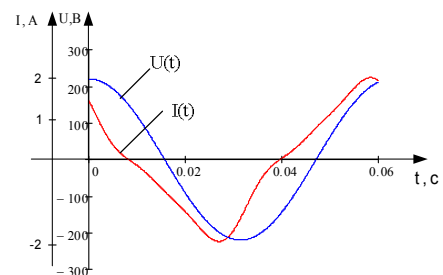


Рисунок 3 – Кривые напряжения и тока

С учетом приведенных параметров система идентификационных уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} 150 &= 3,1a_2 - 4,8a_4 + 1,5R; \\ 160 &= -3385a_4 - 171,5a_0 - 875a_2 + 0,9R; \\ -144 &= -2273a_4 - 87a_0 - 555a_2 - 1,7R; \\ 10,6 &= 1078a_2 - 5111a_4 - 117a_0 - 0,09R. \end{aligned}$$

В результате решения системы получены следующие параметры:

$$R = 99 \text{ Ом}; a_0 = 1,44; a_2 = -0,4; a_4 = 0,05.$$

Идентификация параметров нелинейностей может быть выполнена с помощью подстановки полученных параметров в выражение (12): $L_0 = 0,91; L_{2a} = 0,18; L_{2b} = 0,39; L_{4a} = -0,024; L_{4b} = 0,065.$

Тогда зависимость $L(t)$ примет вид:

$$L(t) = 0,93 + 0,18 \cos(2\Omega t) + 0,39 \sin(2\Omega t) - 0,024 \cos(4\Omega t) + 0,065 \sin(4\Omega t). \quad (15)$$

Кривая изменения нелинейной индуктивности представлена на рис. 4.

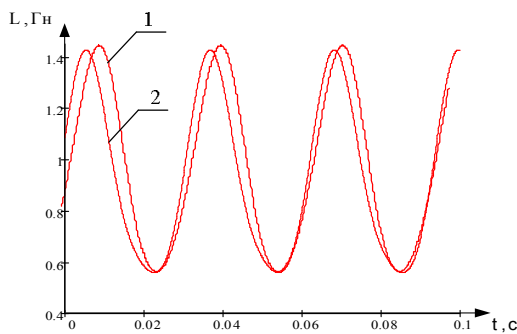


Рисунок 4 – Кривая изменения индуктивности от времени: 1 – фактическая кривая, полученная путем моделирования; 2 – расчетная кривая

Существующая погрешность между фактическими и расчетными данными обусловлена тем, что при расчете учитываются только высшие и наиболее значимые гармоники. Таким образом, необходимая точность расчета параметров определяет количество гармоник исходных параметров.

В случае, когда необходимо определить только параметры нелинейной индуктивности, систему уравнений получают из выражения:

$$P_i(t) = P_R(t) + P_{L(t)}(t),$$

$$L(t) = L_0 + L_{2a} \cos(2\Omega t) + L_{2b} \sin(2\Omega t) + L_{4a} \cos(4\Omega t) + L_{4b} \sin(4\Omega t).$$

Для определения параметров нелинейности $L(t)$ также используют энергетический метод с последующим составлением системы уравнений баланса мгновенной мощности для рассматриваемой электрической цепи.

Решение соответствующих систем идентификационных уравнений позволяет получить зависимости для определения параметров всех составляющих электрической цепи. Если вышеприведенные уравнения включать в систему, где в качестве неизвестного будет $R(I)$ наряду с $L(I)$ и $L(t)$, то это пред-

посылки для определения потерь в стали в зависимости от изменения напряжения.

Таким образом, анализ энергопроцессов энергетическим методом позволяет выполнить их оценку с соблюдением закона сохранения, составить систему с необходимым количеством уравнений для определения параметров нелинейности и получить не только количественную, но и качественную оценку происходящих в цепи процессов.

Указанный подход может быть применен к идентификации технологических нелинейностей в составе электромеханических комплексов различной физической природы. Подтверждением сказанному являются гидротранспортные системы (ГТС), энергетический канал которых характеризуется сложными процессами энергопреобразования, что обусловлено нелинейными свойствами входящих в структуру ГТС элементов: насосов, трубопроводной сети, запорно-регулирующей арматуры, а также протекающими гидродинамическими процессами (турбулентными, кавитационными, помпажными и т.п.).

Одними из наиболее сложных и часто встречающихся явлений, возникающих в процессе функционирования ГТС, являются кавитационные явления, сопровождающиеся образованием и схлопыванием пузырьков газа в потоке жидкости (рис. 5), что приводит к появлению периодических автоколебаний расхода и давления в гидросистеме с амплитудой до 25 % от действующего значения и частотой в пределах $f_{kav} = 1 - 50$ Гц [14].

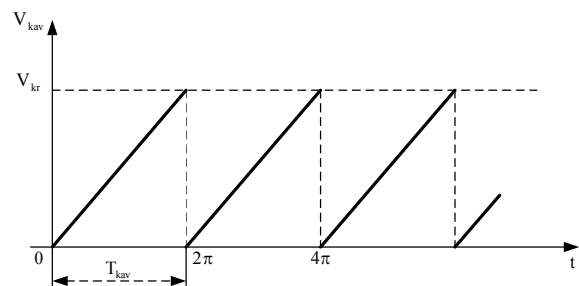


Рисунок 5 – Кривая изменения объема кавитационной каверны во времени

При работе насосной установки с постоянной частотой вращения из-за наличия кавитационных пульсаций в трубопроводной сети в сигналах напора и расхода присутствует как постоянная составляющая, так и переменная компонента $H(t) = H_0 + H_{var}(t); Q(t) = Q_0 + Q_{var}(t)$. Ввиду того, что гидравлическая мощность $P_g(t)$ равна произведению напора $H(t)$ и расхода $Q(t)$, кавитационные процессы приводят к изменению энергетического состояния насосного комплекса, росту эффективных значений гидравлической мощности, снижению полезной мощности у потребителя.

Приведенная на рис. 5 нелинейная характеристика относится к периодическим несинусоидальным функциям, которая может быть описана тригонометрическим рядом вида [15]:

$$V_{kav}(t) = \pi - 2 \left(\frac{\sin(\Omega t)}{1} + \frac{\sin(2\Omega t)}{2} + \frac{\sin(3\Omega t)}{3} + \dots \right). \quad (16)$$

С другой стороны, объем кавитационной каверны зависит от разности расходов на участках трубопроводной сети:

$$V_{kav} = \frac{I}{T_{kav}} \int_0^T (Q_i(t) - Q_{i-1}(t)) dt, \quad (17)$$

где $T_{kav} = \frac{V_{kr}}{G} \gamma$ – постоянная времени кавитации;

V_{kr} – критический объем кавитационной каверны, при достижении которого происходит ее схлопывание; G – весовой расход жидкости; γ – удельный вес жидкости.

Дифференцируя последнее выражение, получим:

$$\frac{dV_{kav}(t)}{dt} = \frac{(Q_i(t) - Q_{i-1}(t))}{T_{kav}},$$

где $\frac{dV_{kav}(t)}{dt} = \pi - 2(\cos(\Omega t) + \cos(2\Omega t) + \cos(3\Omega t) + \dots)$.

С учетом вышесказанного, переменный во времени характер изменения расхода в трубопроводной сети также может быть представлен тригонометрической суммой вида:

$$Q(t) = Q_0 + \sum_{k=1}^{\infty} Q_k \cos(k\Omega t), \quad (18)$$

где Q_0, Q_k – амплитудные значения постоянной и переменной составляющих расхода; k – номер гармоники; Ω – угловая частота.

Напор и расход в насосном комплексе связаны между собой квадратичной зависимостью:

$$H(t) = A_2 + B_2 Q(t) + C_2 Q^2(t). \quad (19)$$

Полезная гидравлическая мощность на выходе системы:

$$P_{gc}(t) = \rho g H(t) Q(t) = \frac{\rho g}{1000} (A_2 Q(t) + B_2 Q^2(t) + C_2 Q^3(t)), \quad (20)$$

где в выражениях (19), (20): A_2, B_2, C_2 – коэффициенты аппроксимации, определяемые по паспортным характеристикам насоса; ρ – плотность перекачиваемой жидкости; g – ускорение свободного падения.

Выполнив подстановку (18) в (20), получим:

$$P_{gc}(t) = P_0 + \sum_{r=1}^R P_r \cos(r\Omega t), \quad (21)$$

где P_0, P_r – амплитудные значения постоянной и переменной составляющих мощности; r – номер гармоники мощности.

Непроизводительные потери мощности, обусловленные кавитацией в трубопроводной сети, могут быть записаны в виде:

$$\Delta P_{kav}(t) = \rho g Q(t) \Delta H_{kav}(t), \quad (22)$$

где $\Delta H_{kav}(t) = R_{kav}(t) Q^2(t)$ – потери напора в канале кавитации, подключенном к первому участку трубопровода;

$$R_{kav} = \frac{\zeta_{kav}}{2gS^2} = K_{kav} V_{kav} -$$

гидравлическое сопротивление, создаваемое кавитационными кавернами.

Тогда уравнение баланса мгновенных мощностей в насосном комплексе:

$$P_{gc}(t) = P_{el}(t) - \Delta P_{mech}(t) - \Delta P_{gp}(t) - \Delta P_{\Sigma gn}(t) - \Delta P_{kav}(t), \quad (23)$$

где $P_{el}(t)$ – электрическая мощность на выходе преобразователя частоты; $P_{gc}(t)$ – гидравлическая мощность потребителя; $\Delta P_{mech}(t)$ – потери механической мощности; $\Delta P_{gp}(t)$ – потери мощности в насосе; $\Delta P_{\Sigma gn}(t)$ – суммарные потери мощности в трубопроводе; $\Delta P_{kav}(t)$ – потери мощности на кавитацию.

Канал кавитации является генератором высших гармонических в спектре мощности. Составляя систему идентификационных уравнений по гармоническим составляющим мощности с учетом математического аппарата мгновенной мощности, приведенного выше, предоставляется возможность определения параметров кавитационных процессов (амплитуды и частоты) в реальных условиях эксплуатации электромеханического комплекса. Полученные результаты могут быть использованы при идентификации технического состояния рассматриваемых электротехнологических объектов, что особенно важно в задачах прогноза и управления аварийными режимами их работы.

ВЫВОДЫ. В работе показано, что энергетический метод эффективно применим для решения практических задач идентификации электрических цепей при наличии нелинейности. Основными преимуществами такого метода являются:

- возможность решения задачи по определению параметров насыщения нелинейной индуктивности и других элементов нелинейными характеристиками и свойствами;

- энергетический метод является универсальным и применим к различного рода системам, включающим нелинейные элементы со сложными динамическими характеристиками;

- в основе предложенного метода лежит закон сохранения энергии;

- применение метода мгновенной мощности для составления системы уравнений по каждой гармонике позволяет получить достаточное количество идентификационных уравнений для определения параметров электрических цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник КДПУ. – 2003. – Вип. 1. – С. 80–85.
2. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах // XIV Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета, 20–22 марта 2007 г. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507–512.
3. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с

полигармоническим напряжением и током // *Электротехника*. – 2004. – № 6. – С. 37–41.

4. Зевеке Г.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.

5. Френкель А., Бар-Хиллел И. Основы теории множеств. – М.: Наука, 1966. – 336 с.

6. Зиновьев А.А., Филиппов Л.И. Введение в теорию сигналов и цепей. – М.: Высшая школа, 1968. – 280 с.

7. Скубов Д.Ю., Ходжаев К.Ш. Нелинейная электромеханика. – М.: Физматлит, 2003. – 360 с.

8. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Связь, 1972. – 326 с.

9. Огарь В.А., Родкин Д.И., Калинов А.П. Обоснование аналитической оценки потерь в насыщаемой стали асинхронного двигателя // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2007. – Вип. 4/2007 (45). – С. 98–103.

10. Крогерис А.Ф. Мощность переменного тока. – Рига: Физико-энергетический институт, 1993. – 294 с.

11. Родкин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. Часть 2. Определение и использование показателей энергетических режимов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 106–115.

12. Родкин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами // *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. – 2004. – Вип. 15. – С. 10–18.

13. Дезоер Ч.А., Ку Э.С. Основы теории цепей. – М.: Связь, 1976. – 200 с.

14. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / В.В. Пилипенко, В.В. Задонцев, М.С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

15. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 608 с.

ENHANCEMENT CAPABILITIES OF ENERGY METHOD IN TASK OF IDENTIFICATION NONLINEARITY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM

D. Rodkin, D. Mosyundz, A. Chorny, T. Korenkova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: ieesu@kdu.edu.ua

Proposed a mathematical apparatus for determining the parameters of nonlinear electromechanical systems, that based on energy balance of the instantaneous power of each harmonic. It is shown that this approach allows to obtain a sufficient number of the identity equations to determine the electromagnetic parameters of the systems, taking into account nonlinearities.

Key words: method of instantaneous power, energy diagnostics, identification, nonlinear inductance.

REFERENCES

1. Rodkin D. The principle of superposition in the processes of energy conversion // *Bulletin KSPU*. – 2003. – Iss. 1. – PP. 80–85. [in Russian]

2. Rodkin D., Romashihin Yu. Facilities and efficiency of the method energy diagnostics to identification task // *XIV International scientific-technical conference. "The problem of automatization electric drive. Theory and practice"*, 20–22 March 2007. Collection of Scientific Papers of Dnyproderzhynskiy State Technical University. – Dnyproderzhynsk: DSTU. – 2007. – PP. 507–512. [in Russian]

3. Rodkin D., Byalobrzhesky A., Lomonos A. Indicators energy process in circuit with poligarmonic voltage and current // *Electrotechnology*. – 2004. – № 6. – PP. 37–41. [in Russian]

4. Zeveke G. *Basics of circuit theory*. – М.: Energoatomizdat, 1989. – 527 p. [in Russian]

5. Frenkel A., Bar-Hillel I. *Foundations of set theory*. – М.: Nauka, 1966. – 336 p. [in Russian]

6. Zinoviev A., Filippov L. *Introduction to a theory of signals and circuits*. – М.: Vysshaya shkola, 1968. – 280 p.

7. Skubov D., Khodjaev K. *Nonlinear electromechanics*. – М.: Fizmatlit, 2003. – 360 p. [in Russian]

8. Andreev V. *The theory of nonlinear electric circuits*. – М.: Svyaz, 1972. – 326 p. [in Russian]

9. Ogar V., Rodkin D., Kalinov A. A justification of analytical estimates of losses in saturated steel induction motor. // *Bulletin KSPU*. – 2007. – Iss. 4/2007 (45). – PP. 98–103. [in Russian]

10. Krogeris A. *AC power*. – Riga: Institute of Physics and Power Engineering, 1993. – 294 p. [in Russian]

11. Rodkin D. Commentary on the theory of energy processes with polyharmonic signals. Part 2. The definition and use of indicators of the energy modes // *Bulletin KSPU*. – 2005. – Iss. 3/2005 (32). – PP. 106–115. [in Russian]

12. Rodkin D. Commentary on the theory of energy processes with polyharmonic signals // *Bulletin of Kirovograd National Technical University*. – 2004. – Iss. 15. – PP. 10–18. [in Russian]

13. Dezoer Ch., Ku E. *Fundamentals of circuit theory*. – М.: Svyaz, 1976. – 200 p. [in Russian]

14. *Cavitation oscillations and the dynamics of hydraulic systems* / V.V. Pilipenko, V.V. Zadontsev, M.S. Natanzon. – М.: Mashinostroenie, 1977. – 352 p. [in Russian]

15. *Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges* / I.N. Bronshtein, K.A. Semendyaev. – М.: Gos. Publishers of Technical and Theoretical Literature, 1955. – 608 p. [in Russian]

Стаття надійшла 16.05.2012.

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