

МГНОВЕННАЯ МОЩНОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Введение. В последние годы существенно возрос интерес к методам исследования электротехнических устройств и систем с использованием энергетических методов, базирующихся на представлении процессов преобразования энергии в форме уравнений баланса мгновенной мощности на элементах схемы замещения для всех компонент – ортогональных составляющих гармоник мгновенной мощности [5-9], которая в соответствии с традиционными представлениями равна произведению текущих значений напряжения и тока. Уравнения баланса такого рода строго соответствуют закону сохранения, чем обеспечивается по существу высокое качество получаемых результатов. Однозначно установлено, что энергетические критерии в задачах идентификации параметров электротехнических схем дают наиболее приемлемые результаты.

Класс задач, решаемых с помощью разработанного метода, достаточно широк. Это задачи идентификации, определения параметров сложных процессов преобразования энергии в электромеханических системах с полигармоническими напряжениями и токами, исследования режимов работы электрических машин с дефектами и др. [5, 7].

Применимость метода мгновенной мощности при той или иной постановке задачи определяется в основном возможностью описания характеристик элементов, входящих в анализируемую схему, независимо от того, линейный или нелинейный элемент (сопротивление, индуктивность и т.п.).

Сейчас хорошо отработан аппарат оценки параметров мгновенной мощности для линейных элементов. Более детальные исследования процессов требуют исключения неточностей, вызываемых упрощающими предположениями, в частности, линеаризацией нелинейных элементов. Аппарат мгновенной мощности для нелинейных систем – это решаемая, достаточно сложная научная задача.

Постановка задач исследования. Целью работы является разработка математического аппарата определения составляющих мгновенной мощности в линейных и нелинейных элементах однофазной и трехфазной электрических цепей.

Материалы исследования. Ранее отмечено, что анализ энергопроцессов, проходящих в электрических цепях, может проводиться с использованием составляющих мгновенной мощности. Мгновенная мощность для любого элемента электрической цепи определяется в виде произведения сигнала напряжения на сигнал тока $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ [1-4]. Определение составляющих мгновенной мощности линейных элементов рассмотрено в [5, 7]. В исследовании авторов взяты сигналы $U(t)$ и $I(t)$, включающие, кроме основной гармоники, высшие гармоники соответствующих порядков.

В нелинейном элементе напряжение описывается сложной зависимостью от времени, тока, его интеграла или производной [7]. В соответствии с изложенным мгновенная мощность нелинейных элементов электрической цепи определяется в виде:

– для нелинейного активного сопротивления:

$$P_R(t) = U(t) \cdot I(t) = E_R(t) \cdot I(t) = (I(t) \cdot R(t)) \cdot I(t); \quad (1)$$

– для нелинейной индуктивности:

$$P_L(t) = E_L(t) \cdot I(t) = \frac{d(I(t) \cdot L(t))}{dt} \cdot I(t); \quad (2)$$

– для нелинейной емкости:

$$P_C(t) = E_C(t) \cdot I(t) = \left(\int \frac{I(t)}{C(t)} dt \right) \cdot I(t). \quad (3)$$

Выражение для тока при этом имеет вид:

$$I(t) = \sum_{m=0}^M I_m \cos(m\Omega t - \psi_m);$$

или с учетом преобразований:

$$I(t) = I_0 + \sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=1}^M I_{mb} \sin(m\Omega t), \quad (4)$$

где I_0 – постоянная составляющая тока; I_{ma}, I_{mb} – амплитудные значения косинусных и синусных составляющих тока высших гармоник; m – номер гармоники тока; M – число гармоник тока; Ω – круговая частота сети; ψ_m – угол сдвига фаз между током и осью, принимаемой за нулевое положение векторов.

Соответствующим образом представляется напряжение:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^N U_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_{nb} \sin(n\Omega t),$$

где U_0 – постоянная составляющая напряжения; U_{na}, U_{nb} – амплитудные значения косинусных и синусных составляющих напряжения высших гармоник; n – номер гармоники напряжения; N – число гармоник напряжения.

Исходя из вышеизложенного, электродвижущая сила или напряжение на нелинейном сопротивлении определяется в виде:

$$E_R(t) = I(t) \cdot R(t), \quad (5)$$

где $R(t)$ – нелинейное сопротивление:

$$R(t) = R_0 + \sum_{z=1}^Z R_{za} \cos(z\Omega t) + \sum_{z=1}^Z R_{zb} \sin(z\Omega t), \quad (6)$$

где R_0 – постоянная составляющая нелинейного сопротивления; R_{za}, R_{zb} – соответственно косинусные и синусные составляющие нелинейного сопротивления на высших гармониках; z – номер составляющей нелинейного сопротивления; Z – число составляющих нелинейного сопротивления.

Математические преобразования позволяют получить выражение для электродвижущей силы в виде:

$$E_R(t) = A_0 + \sum_{s=1}^S A_s \cos(s\Omega t) + \sum_{s=1}^S B_s \sin(s\Omega t), \quad (7)$$

где A_0 – постоянная составляющая ЭДС:

$$A_0 = R_0 I_0, \quad (8)$$

A_s – косинусные составляющие ЭДС:

$$A_s = \sum_{m=s}^S (I_{ma} R_0 + \sum_{z=s}^S R_{za} I_0 + \sum_{s=z\pm m} \frac{1}{2} R_{za} I_{ma} - \sum_{\substack{s=m\pm z \\ z < s \text{ или } z < m}} \frac{1}{2} R_{zb} I_{nb} + \sum_{\substack{s=z\pm m \\ z > s, z > m}} \frac{1}{2} R_{zb} I_{mb}), \quad (9)$$

B_s – синусные составляющие ЭДС:

$$B_s = \sum_{m=s}^S (I_{mb} R_0 - \sum_{z=s}^S R_{zb} I_0 + \sum_{s=m\pm m} \frac{1}{2} R_{za} I_{mb} - \sum_{\substack{s=m\pm z \\ z < m}} \frac{1}{2} R_{zb} I_{ma} + \sum_{\substack{s=z\pm m \\ z > m}} \frac{1}{2} R_{zb} I_{ma}). \quad (10)$$

Составляющие ЭДС на нелинейной емкости определяются в виде:

$$E_C(t) = \frac{1}{T} \int \left(\frac{1}{C(t)} \cdot I(t) \right) dt, \quad (11)$$

где $C(t)$ – нелинейная емкость:

$$\frac{1}{C(t)} = C_0 + \sum_{q=1}^Q C_{qa} \cos(q\Omega t) + \sum_{q=1}^Q C_{qb} \sin(q\Omega t), \quad (12)$$

где C_0 – постоянная составляющая нелинейной емкости; C_{qa}, C_{qb} – соответственно косинусные и синусные составляющие нелинейной емкости на высших гармониках; q – номер составляющей нелинейной емкости; Q – число составляющих, аппроксимирующих нелинейную емкость;

$$E_C(t) = A_0 + \sum_{s=1}^S A_s \cos(s\Omega t) + \sum_{s=1}^S B_s \sin(s\Omega t), \quad (13)$$

где постоянная составляющая ЭДС:

$$A_0 = \frac{2t}{\Omega T} C_0 I_0, \quad (14)$$

косинусные составляющие ЭДС:

$$A_s = \frac{1}{T} \left(\sum_{s=1}^S C_0 \left(t I_{ma} - \frac{1}{m\Omega} I_{mb} \right) + \sum_{s=1}^S \left(t C_{qa} - \frac{1}{q\Omega} C_{qb} \right) I_0 - \sum_{s=1}^S \left(\frac{1}{2m\Omega} + \frac{1}{2q\Omega} \right) C_{qa} I_{mb} - \right. \\ \left. - \sum_{s=1}^S \left(\frac{1}{2m\Omega} + \frac{1}{q\Omega} \right) C_{qb} I_{ma} + \left(\frac{1}{2m\Omega} + \frac{1}{q\Omega} \right) C_{qb} I_{ma} \right), \quad (15)$$

синусные составляющие ЭДС:

$$B_s = \frac{1}{T} \left(\sum_{s=1}^S \left(C_0 \left(\frac{1}{m\Omega} I_{ma} + t I_{mb} \right) + \sum_{s=1}^S \left(\frac{1}{q\Omega} C_{qa} + t C_{qb} \right) I_0 + \sum_{s=1}^S \frac{1}{2m\Omega} C_{qb} I_{mb} - \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{s=1}^S \frac{1}{2m\Omega} C_{qb} I_{mb} + \sum_{s=1}^S \left(\frac{1}{2m\Omega} + \frac{1}{2q\Omega} \right) C_{qa} I_{ma} \right) \right). \quad (16)$$

Величина ЭДС на нелинейной емкости зависит от начального заряда. Поэтому выражение для ЭДС на нелинейной емкости будет иметь вид:

$$E_C(t) = U_{C0} + A_0 + \sum_{s=1}^S A_s \cos(s\Omega t) + \sum_{s=1}^S B_s \sin(s\Omega t) = A'_0 + \sum_{s=1}^S A_s \cos(s\Omega t) + \sum_{s=1}^S B_s \sin(s\Omega t). \quad (17)$$

Для анализа процессов в насыщаемой индуктивности кривую намагничивания аппроксимируем следующим полиномом:

$$\Phi(I) = a_1 \cdot I + a_3 \cdot I^3 + \dots + a_p \cdot I^{2p+1}, \quad (18)$$

где I – ток, протекающий через нелинейную индуктивность; a_1, a_3, \dots, a_p – постоянные коэффициенты; p – номер составляющей, аппроксимирующей поток нелинейной индуктивности.

Коэффициенты a_1, a_3, \dots, a_p определяются при аппроксимации кривой намагничивания (рис. 1).

При насыщении стали индуктивность зависит от тока и может быть представлена в следующем виде:

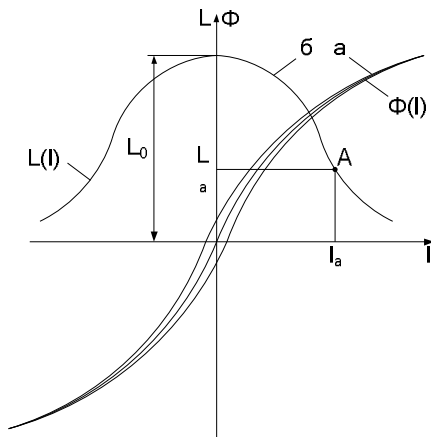


Рис. 1. Кривая намагничивания и зависимость насыщаемой индуктивности от тока $L(I)$

$$L(I) \equiv \frac{d\Phi(I)}{dt} = \alpha_1 + 3\alpha_3 \cdot I^2(t) + \dots + (2p+1)\alpha_{2p+1} \cdot I^{2p}(t). \quad (19)$$

Зависимость индуктивности от времени получим, подставив в последнее выражение временную зависимость тока:

$$L(t) = \alpha_1 + 3\alpha_3 \cdot (I_{3a} \cos(3\Omega t) + I_{3b} \sin(3\Omega t))^2 + \dots + (2p+1)\alpha_{2p+1} \times \\ \times (I_0 + I_{ma} \cos(m\Omega t) + I_{mb} \sin(m\Omega t))^{2p}. \quad (20)$$

Преобразовав последнее уравнение, получим выражение для индуктивности в следующем виде:

$$L(t) = L_0 + \sum_{p=2}^P L_{pa} \cos(p\Omega t) + \sum_{p=2}^P L_{pb} \sin(p\Omega t), \quad (21)$$

где L_0 – постоянная составляющая нелинейной индуктивности; L_{pa}, L_{pb} – соответственно косинусные и синусные составляющие нелинейной индуктивности на высших гармониках; p – значение составляющей нелинейной индуктивности; P – число переменных составляющих нелинейной индуктивности.

Для анализа примем следующее упрощенное выражение для насыщаемой индуктивности:

$$L(t) = L_0 - \alpha \cdot (I(t))^2. \quad (22)$$

Тогда составляющие насыщенной индуктивности для данного случая имеют вид:

$$L'_0 = L_0 - \frac{1}{2} \alpha \sum_{m=1}^M \left(I_m^2 \cos^2 \gamma_m + \frac{1}{2} I_m^2 \sin^2 \gamma_m \right);$$

$$\begin{aligned}
L_{pa} = & \alpha \left(\sum_{p=2m}^M \left(\frac{1}{2} I_m^2 \cos^2 \gamma_m - \frac{1}{2} I_m^2 \sin^2 \gamma_m \right) + \right. \\
& \left. + \sum_{\substack{p=m_1 \pm m_2 \\ m=m_1=m_2}}^M \left(I_{m_1} I_{m_2} \cos \gamma_{m_1} \cos \gamma_{m_2} + I_{m_1} I_{m_2} \sin \gamma_{m_1} \sin \gamma_{m_2} - I_{m_1} I_{m_2} \frac{\sin \gamma_{m_1} \sin \gamma_{m_2}}{p=|m_1-m_2|} \right) \right); \\
L_{pb} = & \alpha \left(\sum_{p=2m}^M I_m^2 \cos \gamma_m \sin \gamma_m + \right. \\
& \left. + \sum_{\substack{p=m_1 \pm m_2 \\ m=m_1=m_2}}^M \left(I_{m_1} I_{m_2} \cos \gamma_{m_1} \sin \gamma_{m_2} - I_{m_1} I_{m_2} \sin \gamma_{m_1} \cos \gamma_{m_2} + I_{m_1} I_{m_2} \frac{\sin \gamma_{m_1} \cos \gamma_{m_2}}{p=|m_1-m_2|} \right) \right).
\end{aligned} \tag{23}$$

где $m = m_1 = m_2$ – гармоники тока, γ_m – угол между нелинейной индуктивностью и током на соответствующих гармониках:

$$\gamma_m = m \cdot \gamma_1, \tag{24}$$

здесь γ_1 – угол отставания потока в нелинейной индуктивности от тока первой гармоники.

Электродвижущая сила на индуктивности определяется производной от произведения тока и нелинейной индуктивности:

$$E_L(t) = \frac{d}{dt}(L(t) \cdot I(t)) = L(t) \cdot \frac{d}{dt}(I(t)) + I(t) \cdot \frac{d}{dt}(L(t)). \tag{25}$$

Преобразовав, получим:

$$E_L(t) = \sum_{s=1}^S A_s \cos(s\Omega t) + \sum_{s=1}^S B_s \sin(s\Omega t), \tag{26}$$

где косинусные составляющие:

$$A_s = \Omega \left(\sum_{\substack{s=1 \\ m=s}}^S (m L_0 I_{mb}) + \sum_{\substack{s=1 \\ p=s}}^S p L_{pb} I_0 + \sum_{\substack{s=1 \\ s=p \pm m}}^S \frac{s}{2} L_{pb} I_{ma} + \sum_{\substack{s=1 \\ s=m \pm p \\ p < s \text{ или } p < m}}^S \frac{s}{2} L_{pa} I_{mb} - \sum_{\substack{s=1 \\ s=p \pm m \\ p > s, p > m}}^S \frac{s}{2} L_{pa} I_{mb} \right), \tag{27}$$

синусные составляющие:

$$B_s = \Omega \left(\sum_{\substack{s=1 \\ m=s}}^S (-n L_0 I_{ma}) - \sum_{\substack{s=1 \\ p=s}}^S p L_{pa} I_0 - \sum_{\substack{s=1 \\ s=p \pm m}}^S \frac{s}{2} L_{pa} I_{ma} + \sum_{\substack{s=1 \\ s=m \pm p \\ p < m}}^S \frac{s}{2} L_{pb} I_{mb} - \sum_{\substack{s=1 \\ s=p \pm m \\ p > m}}^S \frac{s}{2} L_{pb} I_{mb} \right), \tag{28}$$

где s – номер гармоники косинусных и синусных составляющих ЭДС; S – число гармоник косинусных и синусных составляющих ЭДС.

Таким образом, мгновенная мощность элементов электрической цепи определяется в виде:

$$P(t) = E(t) \cdot I(t) = \left(\sum_{s=1}^S A_s \cos(s\Omega t) + \sum_{s=1}^S B_s \sin(s\Omega t) \right) \left(I_0 + \sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=1}^M I_{mb} \sin(m\Omega t) \right). \tag{29}$$

Отсюда следует, что энергопроцессы в электрической цепи могут быть описаны в форме мгновенных мощностей на линейных и нелинейных элементах (активном сопротивлении, индуктивности и ёмкости).

Для процесса формирования составляющих мгновенной мощности трехфазной системы необходимо учесть то, что сигналы напряжения и тока фаз сдвинуты друг относительно друга на угол, который зависит от начального фазового угла и от порядка гармоники соответствующего сигнала. Таким образом сигналы напряжения и тока фазы А примут вид:

$$\begin{aligned}
U_A(t) &= \sum_{n=1}^N U_{nA} \cos(n_A \Omega t - \varphi_{nA} - \psi_{nA}); \\
I_A(t) &= \sum_{m=1}^M I_{mA} \cos(m_A \Omega t - \varphi_{mA} - \psi_{mA}),
\end{aligned} \tag{30}$$

где U_{nA} – гармонические составляющие напряжения фазы А; I_{mA} – гармонические составляющие тока фазы А; n_A, m_A – номера гармоник соответственно напряжения и тока фазы А; $\varphi_{nA}, \varphi_{mA}$ – углы сдвига фаз между напряжением, током фазы А и осью, принимаемой за нулевое положение векторов; ψ_{nA}, ψ_{mA} – углы сдвига фаз гармоник напряжения и тока фазы А (при симметричной системе $\psi_{nA} = \psi_{mA} = 0$).

Сигналы напряжения и тока фазы В:

$$\begin{aligned}
U_B(t) &= \sum_{n=1}^N U_{nB} \cos(n_B \Omega t - \varphi_{nB} - \psi_{nB}); \\
I_B(t) &= \sum_{m=1}^M I_{mB} \cos(m_B \Omega t - \varphi_{mB} - \psi_{mB}),
\end{aligned} \tag{31}$$

где при симметричной системе $\psi_{nB} = n_B \cdot 120^\circ$, $\psi_{mB} = m_B \cdot 120^\circ$.

Сигналы напряжения и тока фазы С:

$$\begin{aligned}
U_C(t) &= \sum_{n=1}^N U_{nC} \cos(n_C \Omega t - \varphi_{nC} - \psi_{nC}); \\
I_C(t) &= \sum_{m=1}^M I_{mC} \cos(m_C \Omega t - \varphi_{mC} - \psi_{mC}),
\end{aligned} \tag{32}$$

где при симметричной системе $\psi_{nC} = n_C \cdot 240^\circ$, $\psi_{mC} = m_C \cdot 240^\circ$.

Мгновенная мощность определяется произведением сигналов напряжения и тока:

$$\begin{aligned}
P_A(t) &= U_A(t)I_A(t) = \left(\sum_{n=1}^N U_{naA} \cos(n_A \Omega t - \psi_{nA}) + \sum_{n=1}^N U_{nbA} \sin(n_A \Omega t - \psi_{nA}) \right) \times \\
&\times \left(\sum_{m=1}^M I_{mA} \cos(m_A \Omega t - \psi_{mA}) + \sum_{m=1}^M I_{mbA} \sin(m_A \Omega t - \psi_{mA}) \right),
\end{aligned} \tag{33}$$

или

$$\begin{aligned}
P_A(t) &= \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naA} I_{maA} - U_{nbA} I_{mbA}) \cos((n_A + m_A) \Omega t - \psi_{nA} - \psi_{mA})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naA} I_{maA} + U_{nbA} I_{mbA}) \cos((n_A - m_A) \Omega t - \psi_{nA} + \psi_{mA})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naA} I_{mbA} + U_{nbA} I_{maA}) \sin((n_A + m_A) \Omega t - \psi_{nA} - \psi_{mA})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naA} I_{mbA} - U_{nbA} I_{maA}) \sin((m_A - n_A) \Omega t + \psi_{nA} - \psi_{mA})).
\end{aligned} \tag{34}$$

Аналогично определяются выражения для мгновенной мощности фаз В и С:

$$\begin{aligned}
P_B(t) &= \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naB} I_{maB} - U_{nbB} I_{mbB}) \cos((n_B + m_B) \Omega t - \psi_{nB} - \psi_{mB})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{m,n=1}^{M,N} ((U_{naB} I_{maB} + U_{nbB} I_{mbB}) \cos((n_B - m_B) \Omega t - \psi_{nB} + \psi_{mB})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naB} I_{mbB} + U_{nbB} I_{maB}) \sin((n_B + m_B) \Omega t - \psi_{nB} - \psi_{mB})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{m,n=1}^{M,N} ((U_{naB} I_{mbB} - U_{nbB} I_{maB}) \sin((m_B - n_B) \Omega t + \psi_{nB} - \psi_{mB})); \\
P_C(t) &= \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naC} I_{maC} - U_{nbC} I_{mbC}) \cos((n_C + m_C) \Omega t - \psi_{nC} - \psi_{mC})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naC} I_{maC} + U_{nbC} I_{mbC}) \cos((n_C - m_C) \Omega t - \psi_{nC} + \psi_{mC})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naC} I_{mbC} + U_{nbC} I_{maC}) \sin((n_C + m_C) \Omega t - \psi_{nC} - \psi_{mC})) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} ((U_{naC} I_{mbC} - U_{nbC} I_{maC}) \sin((m_C - n_C) \Omega t + \psi_{nC} - \psi_{mC})).
\end{aligned} \tag{36}$$

Мощность трехфазной сети определяется суммой мощностей всех фаз. Приведение подобных позволяет получить выражение для мгновенной мощности для симметричной системы в следующем виде:

$$P_{\Sigma k}(t) = P_A(t) + P_B(t) + P_C(t) = \frac{3}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} (U_{na} I_{ma} + U_{nb} I_{mb}) + \frac{3}{2} \sum_{n,m=1}^{N,M} \left((U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb}) \cos(k\Omega t) + (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma}) \sin(k\Omega t) \right) \quad (37)$$

$k=3n$

Анализ показывает, что в условно симметричной трехфазной системе с несинусоидальными напряжениями и токами (каждая из гармоник напряжения, тока входит в состав своей симметричной системы) гармонический состав мгновенной мощности имеет некоторые особенности, заключающиеся в том, что составляющие, кратные трем, образуют переменные компоненты суммарной мгновенной мощности трехфазной цепи. Это важно в том плане, что мгновенная мощность трехфазной системы определяет, например, временную зависимость момента трехфазного двигателя.

Несимметрия токов фаз двигателя, как показывает анализ, приводит к появлению гармонических мгновенной мощности с частотами, кратными двум по сравнению с частотой сети.

Значительное многообразие режимов, связанных с уровнями гармонических отдельных фаз, несимметрией токов и др., приводит к разнообразным воздействиям на двигатель в части искажения кривой вращающего момента в форме знакопеременных составляющих разных частот. Этот вопрос в виду его масштабности и значимости требует специальных детальных исследований.

Выводы. Аппарат мгновенной мощности для анализа цепей, содержащих нелинейные элементы, применим для линейных и нелинейных цепей и включает в себя три составляющие: постоянную составляющую, синусные и косинусные.

Исследования показали, что частотные преобразования, осуществляющиеся в нелинейных элементах (являющихся не исключением, а наиболее часто встречающейся сущностью конкретного электротехнического элемента), отличаются сложностью, но доступны для анализа. Показано, что исключение из анализа нелинейностей неизбежно приводит к снижению качества и точности результатов, получаемых при использовании аппарата мгновенной мощности.

Исследования подтвердили, что при работе электрической машины в зоне насыщения она становится источником гармоник тока, циркулирующих в сети и роторных контурах. Исследование этого вопроса с использованием новых моделей формирования потерь в стали, возможности их разделения на составляющие позволит получить аналитическую оценку ресурса работоспособности электрических машин при дефектах и некачественном напряжении питания.

Так как источники питания могут быть созданы с различными характеристиками выходного напряжения (источники полигармонического напряжения) с регулируемыми в соответствии с заданием параметрами, то представляется возможным реализовать системы для исследования вибрационных характеристик (получения вибрационного портрета) электрических машин для оценки их работоспособности при дефектах конструкции или при неудовлетворительных показателях качества электроэнергии.

В условно симметричной трехфазной системе при питании двигателя от источника с определенным гармоническим составом кривая момента содержит гармоники, кратные утроенному значению частоты сети. Эти составляющие момента вносят существенное влияние в вибрационный фон электрической машины.

Литература.

1. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электрических двигателей при послеремонтных испытаниях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов - 7-е изд. перераб. и дополненное. - М.: Высш. шк., 1978. - 528 с.
3. Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. и др. Баланс энергий в силовых цепях. - Киев: Наукова думка, 1992. - 312 с.
4. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.
5. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электродвижение переменного тока: Труды международной 14 научнотехнической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. - 2007. - С. 273-278.
6. Родькин Д.И. Уравнения баланса составляющих мгновенной мощности // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Вип. 4/2006 (39), ч.1. - Кременчук. - С. 92-98.
7. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. Вип. 3/2007 (44). - Кременчук. - С. 130-136.
8. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Вип. 1/2003. - Кременчук. - С. 80-85.
9. Калинов А.П., Лейко В.В., Родькин Д.И. Спектральный анализ мгновенной мощности в сети с полигармоническим напряжением и током // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Вип. 3/2006 (38), ч. 2. - Кременчук. - С. 59-72.