

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ РЕШЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Родькин Д.И., д.т.н., проф., Ромашихин Ю.В., асс.*

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина*

*E-mail: romashihin\_yuriy@mail.ru*

Рассмотрен энергетический метод идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей, базирующийся на системе уравнений баланса составляющих мгновенной мощности. Проанализированы численные методы решения системы нелинейных уравнений энергетического метода, обоснован выбор начальных приближений и допустимых ограничений при решении уравнений. Показана особенность энергетического метода при использовании полигармонического и псевдополигармонического питания. Рассмотрена эффективность энергетического метода при идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей.

**Ключевые слова:** энергетический метод, уравнения баланса мощностей, составляющие мгновенной мощности, электромагнитные параметры асинхронных двигателей.

**Введение.** Идентификация электромагнитных параметров (ЭМП) асинхронных двигателей (АД) является важной научно-технической задачей, по существу, частью общей задачи диагностики электрических машин, хотя ее нельзя считать второстепенной. Значения электромагнитных параметров ЭМ используются для решения вопросов, связанных с выбором и расчетом устройств защиты и автоматики машин переменного тока, в задачах испытаний электрических машин и управления потреблением электрической энергии, при решении вопросов исследовательского характера и учебного процесса, при настройке систем управления координатами асинхронных электроприводов с векторным управлением. Идентификация электромагнитных параметров испытуемых машин в условиях электроремонтных цехов является важной и актуальной задачей ввиду того, что позволяет оценить потери энергии в электрической машины, вибрационные моменты, рабочие и пусковые характеристики, составить послеремонтный паспорт электрической машины.

**Анализ предыдущих исследований.** На сегодняшний день большинство методов идентификации ЭМП АД являются нетехнологичными и не удовлетворяют требованиям как испытательного процесса, так и практических задач современного электропривода [1-6]. Наиболее эффективными являются методы, в основе которых лежит использование математических моделей с учетом различного рода дефектов и неисправностей в виде дополнительных нелинейностей и контуров для АД, прошедших ремонт или находящихся долгое время в эксплуатации. Использование составляющих мгновенной мощности в задачах идентификации ЭМП АД позволяет существенно улучшить точность оценивания параметров электромагнитных преобразователей [7-13].

Таким образом, использование существующих методов идентификации электромагнитных параметров АД приводит к эксплуатации двигателей в режимах, не соответствующих регламенту.

**Цель работы.** Определение особенностей энергетического метода идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей и оценка эффективности его применения.

**Материал и результаты исследований.** Одним из современных методов идентификации ЭМП АД является энергетический метод, основанный на использовании уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности источника полигармонического питания и элементов схемы замещения.

Мгновенная мощность определяется произведением сигналов несинусоидальных напряжений и токов. Представим несинусоидальные зависимости напряжения и тока в форме усеченных гармонических рядов при помощи преобразования Фурье [9, 14-19]:

$$U(t) = \sum_{n=0}^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n); \quad (1)$$

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

где  $U_n$  – амплитудные значения составляющих напряжения высших гармоник;  $n$  – номер гармоники напряжения;  $N$  – число гармоник напряжения;  $\Omega$  – частота сети;  $\varphi_n$  – угол сдвига фаз между напряжением и вещественной осью «а»;  $I_m$  – амплитудные значения составляющих тока высших гармоник;  $m$  – номер гармоники тока;  $M$  – число гармоник тока;  $\varphi_m$  – угол сдвига фаз между током и напряжением.

Используя простейшие координатные преобразования с вещественной осью «а» и мнимой «b», получим:

$$U(t) = \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t); \quad (2)$$

$$I(t) = \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t),$$

где

$$\begin{aligned} U_{na} &= U_n \cos(\varphi_n); & I_{ma} &= I_m \cos(\varphi_m); \\ U_{nb} &= U_n \sin(\varphi_n); & I_{mb} &= I_m \sin(\varphi_m), \end{aligned}$$

здесь  $U_{na}$ ,  $I_{ma}$ ,  $U_{nb}$ ,  $I_{mb}$  – косинусные и синусные гармонические составляющие напряжения и тока соответственно.

Для получения несинусоидального напряжения обмоток статора АД необходимо использовать источник полигармонического питания, в качестве которого может выступать тиристорный регулятор напряжения (ТРН) или преобразователь частоты (ПЧ) со сложными законами управления. Поскольку ТРН обладает такими достоинствами, как более низкая стоимость и простота системы управления, надежность элементов силовых цепей, обеспечение требуемого гармонического состава напряжения и тока при изменении угла управления, то именно он используется как источник полигармонического питания. Напряжение и ток при использовании ТРН представлены на рис. 1.

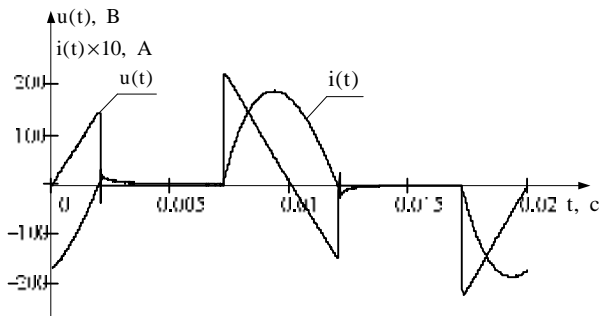


Рисунок 1 – Кривые напряжения и тока при использовании регулятора напряжения

Мгновенная мощность с учетом зависимостей (2) приобретает вид:

$$\begin{aligned} P(t) &= U(t)I(t) = \\ &= \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t) + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t) + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na}I_{ma} + U_{nb}I_{mb}) \cos((m-n)\Omega t) + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na}I_{ma} - U_{nb}I_{mb}) \cos((m+n)\Omega t) + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na}I_{mb} + U_{nb}I_{ma}) \sin((m-n)\Omega t) + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na}I_{mb} - U_{nb}I_{ma}) \sin((m+n)\Omega t). \end{aligned} \quad (3)$$

Из зависимости (3) следует, что мгновенная мощность состоит из двух групп составляющих. Первая группа образуется в результате умножения одночастотных компонент напряжения и тока, т. е. при  $m = n$ . При этом частоты гармоник мгновенной мощности равны:  $k_c = m - n = 0$  и  $k_c = m + n = 2m$ . Нулевая частота  $k = 0$  соответствует постоянному значению мощности.

Вторая группа составляющих мгновенной мощности образуется в результате умножения разночастотных компонент напряжения и тока ( $m \neq n$ ). Частоты гармоник мгновенной мощности при этом равны:  $k_s = m \pm n \neq 0$ .

Анализ энергопроцессов, отражающих поведение электромеханического комплекса, который включает в себя электромеханическую систему и производственный механизм с передаточным устройством, следует проводить с использованием уравнений баланса мощностей или энергий. Эффективное применение такого подхода возможно при наличии совокупности уравнений для составляющих мгновенной мощности во всех элементах электротехнического комплекса. Базовым уравнением баланса является равенство мгновенной мощности источника питания  $P_u(t)$  и сумм мгновенных мощностей элементарных потребителей, входящих в комплекс [20-22]:

$$P_u(t) = \sum_{i=1}^H P_i(t), \quad (4)$$

где  $i$  – индекс соответствующего элементарного потребителя;  $H$  – количество элементарных потребителей.

Баланс мощности вытекает как следствие из теоремы Телледжена: сумма произведений напряжений  $U_i$  и токов  $I_i$  всех ветвей цепи, удовлетворяющих законам Кирхгофа, равна нулю. Произведение  $U_i I_i$  представляет собой мгновенную мощность  $P_i$   $i$ -й ветви, поэтому сумма мощностей всех ветвей цепи равняется нулю. Если выделить ветви с независимыми источниками, то баланс мощности можно сформулировать следующим образом: сумма мощностей, отдаваемых независимыми источниками, равняется сумме мощностей, потребляемых остальными ветвями электрической цепи.

Применительно к известной Т-образной схеме замещения АД с индуктивностями рассеяния статора  $L_1$  и ротора  $L_2$ , индуктивностью контура намагничивания  $L_m$ , сопротивлением статора  $R_1$ , сопротивлением ротора  $R_2$  и сопротивлением контура намагничивания  $R_m$ , в качестве элементарных потребителей выступает каждый из параметров схемы замещения (рис. 2).

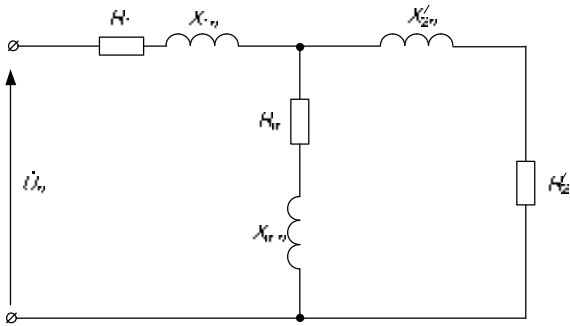


Рисунок 2 – Т-образная схема замещения АД

Уравнение баланса мгновенной мощности одной фазы двигателя составляется в виде равенств составляющих мгновенной мощности источника питания и составляющих мгновенной мощности всех элементов АД [20-22]:

$$P_u(t) = P_{R_1}(t) + P_{R_2}(t) + P_{R_\mu}(t) + P_{L_1}(t) + P_{L_2}(t) + P_{L_\mu}(t), \quad (5)$$

где  $P_{R_1}(t)$ ,  $P_{R_2}(t)$ ,  $P_{R_\mu}(t)$ ,  $P_{L_1}(t)$ ,  $P_{L_2}(t)$ ,  $P_{L_\mu}(t)$  – значения мгновенных мощностей элементов схемы замещения [23, 24]:

– для источника полигармонического напряжения  $P_u(t) = U(t)I(t)$ ;

– для активного сопротивления

$$P_R(t) = E_R(t)I(t) = I^2(t)R;$$

– для индуктивности

$$P_L(t) = E_L(t)I(t) = L \frac{dI(t)}{dt} I(t).$$

Система уравнений баланса мощностей для Т-образной схемы замещения (рис. 2) составляется для каждой из гармоник в виде равенства составляющих мгновенной мощности источника полигармонического напряжения сумме составляющих мгновенной мощности на активных и индуктивных сопротивлениях статорной и роторной цепей и контура намагничивания:

$$\begin{cases} P_{0u} = P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'_2}; \\ P_{kau} = P_{kaR_1} + P_{kaR_\mu} + P_{kaR'_2} + \\ + P_{kaL_1} + P_{kaL_\mu} + P_{kaL'_2}; \\ P_{kbu} = P_{kbR_1} + P_{kbR_\mu} + P_{kbR'_2} + \\ + P_{kbL_1} + P_{kbL_\mu} + P_{kbL'_2}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $P_{0u}$ ,  $P_{0R_1}$ ,  $P_{0R_\mu}$ ,  $P_{0R'_2}$  – постоянные составляющие мгновенной мощности соответственно источника полигармонического напряжения и активных сопротивлений первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи;  $P_{kau}$ ,  $P_{kbu}$  – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности источника полигармонического напряжения;  $P_{kaR_1}$ ,  $P_{kbR_1}$ ,  $P_{kaR_\mu}$ ,  $P_{kbR_\mu}$ ,  $P_{kaR'_2}$ ,  $P_{kbR'_2}$  – косинусные и синусные составляющие мгновенной

мощности на активных сопротивлениях первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи;  $P_{kaL_1}$ ,  $P_{kbL_1}$ ,  $P_{kaL_\mu}$ ,  $P_{kbL_\mu}$ ,  $P_{kaL'_2}$ ,  $P_{kbL'_2}$  – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности на индуктивностях первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи.

При использовании трех гармоник напряжения и тока ( $m = n = 1, 3, 5$ ) составляющие мгновенной мощности имеют вид:

– для источника полигармонического напряжения:

$$P_{0u} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_1} I_{1a_1} + U_{1a_3} I_{1a_3} + U_{1a_5} I_{1a_5} + U_{1b_1} I_{1b_1} + U_{1b_3} I_{1b_3} + U_{1b_5} I_{1b_5} \right);$$

$$P_{2au} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_1} I_{1a_1} + U_{1a_3} I_{1a_3} + U_{1a_5} I_{1a_5} - U_{1b_1} I_{1b_1} + U_{1b_3} I_{1b_3} + U_{1b_5} I_{1b_5} \right);$$

$$P_{2bu} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_1} I_{1b_1} + U_{1a_3} I_{1b_3} + U_{1a_5} I_{1b_5} - U_{1b_1} I_{1a_1} - U_{1b_3} I_{1a_3} - U_{1b_5} I_{1a_5} \right);$$

$$P_{4au} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_1} I_{1a_3} + U_{1a_3} I_{1a_5} + U_{1a_5} I_{1a_1} + U_{1a_3} I_{1b_3} + U_{1a_5} I_{1b_5} - U_{1b_1} I_{1b_3} - U_{1b_3} I_{1b_5} \right);$$

$$P_{4bu} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_1} I_{1b_3} + U_{1a_3} I_{1b_5} + U_{1a_5} I_{1b_1} - U_{1a_3} I_{1b_1} + U_{1b_1} I_{1a_3} - U_{1b_3} I_{1a_5} \right);$$

$$P_{6au} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_1} I_{1a_5} + U_{1a_3} I_{1a_1} + U_{1a_5} I_{1a_3} - U_{1b_1} I_{1b_5} - U_{1b_3} I_{1b_1} - U_{1b_5} I_{1b_3} \right);$$

$$P_{6bu} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_1} I_{1b_5} + U_{1a_3} I_{1b_1} + U_{1a_5} I_{1b_3} + U_{1b_1} I_{1a_5} + U_{1b_3} I_{1a_1} + U_{1b_5} I_{1a_3} \right);$$

$$P_{8au} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_3} I_{1a_5} + U_{1a_5} I_{1a_3} - U_{1b_3} I_{1b_5} - U_{1b_5} I_{1b_3} \right);$$

$$P_{8bu} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_3} I_{1b_5} + U_{1a_5} I_{1b_3} + U_{1b_3} I_{1a_5} + U_{1b_5} I_{1a_3} \right);$$

$$P_{10auS} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_5} I_{1a_5} - U_{1b_5} I_{1b_5} \right);$$

$$P_{10buS} = \frac{1}{2} \left( U_{1a_5} I_{1b_5} + U_{1b_5} I_{1a_5} \right);$$

– для активного сопротивления:

$$P_{0R_i} = \frac{1}{2} \left( I_{ia_1}^2 + I_{ib_1}^2 + I_{ia_3}^2 + I_{ib_3}^2 + I_{ia_5}^2 + I_{ib_5}^2 \right);$$

$$\begin{aligned}
P_{2aR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} &2(I_{ia_1} I_{ia_3} + I_{ib_1} I_{ib_3}) + \\ &+ 2(I_{ia_3} I_{ia_5} + I_{ib_3} I_{ib_5}) + \\ &+ I_{ia_1}^2 - I_{ib_1}^2 \end{aligned} \right); \\
P_{2bR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} &2(I_{ia_1} I_{ib_3} - I_{ia_3} I_{ib_1}) + \\ &+ 2(I_{ia_3} I_{ib_5} - I_{ia_5} I_{ib_3}) + \\ &+ I_{ia_1} I_{ib_1} \end{aligned} \right); \\
P_{4aR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} &2(I_{ia_1} I_{ia_3} - I_{ib_1} I_{ib_3}) + \\ &+ 2(I_{ia_1} I_{ia_5} + I_{ib_1} I_{ib_5}) \end{aligned} \right); \\
P_{4bR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} &2(I_{ia_1} I_{ib_3} + I_{ia_3} I_{ib_1}) + \\ &+ 2(I_{ia_1} I_{ib_5} - I_{ia_5} I_{ib_1}) \end{aligned} \right); \\
P_{6aR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( 2(I_{ia_1} I_{ia_5} - I_{ib_1} I_{ib_5}) + I_{ia_3}^2 - I_{ib_3}^2 \right); \\
P_{6bR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( 2(I_{ia_1} I_{ib_5} + I_{ia_5} I_{ib_1}) + I_{ia_3} I_{ib_3} \right); \\
P_{8aR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( 2(I_{ia_3} I_{ia_5} + I_{ib_3} I_{ib_5}) \right); \\
P_{8bR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( 2(I_{ia_3} I_{ib_5} + I_{ia_5} I_{ib_3}) \right); \\
P_{10aR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( I_{ia_5}^2 - I_{ib_5}^2 \right); \\
P_{10bR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left( I_{ia_5} I_{ib_5} \right);
\end{aligned}$$

– для индуктивности:

$$\begin{aligned}
P_{0L_i} &= 0; \\
P_{2aL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( \begin{aligned} &2I_{ia_1} I_{ib_1} + 2I_{ia_1} I_{ib_3} - 2I_{ib_1} I_{ia_3} + \\ &+ 2I_{ia_3} I_{ib_5} - 2I_{ib_3} I_{ia_5} \end{aligned} \right); \\
P_{2bL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( \begin{aligned} &-I_{ia_1}^2 + I_{ib_1}^2 - 2I_{ia_1} I_{ib_3} - \\ &- 2I_{ib_1} I_{ib_3} - 2I_{ib_3} I_{ia_5} - 2I_{ib_3} I_{ib_5} \end{aligned} \right); \\
P_{4aL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( \begin{aligned} &4I_{ia_1} I_{ib_3} + 4I_{ia_1} I_{ib_5} + \\ &+ 4I_{ib_1} I_{ia_3} - 4I_{ib_1} I_{ia_5} \end{aligned} \right); \\
P_{4bL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( \begin{aligned} &-4I_{ia_1} I_{ia_3} - 4I_{ia_1} I_{ia_5} + \\ &+ 4I_{ib_1} I_{ib_3} - 4I_{ib_1} I_{ib_5} \end{aligned} \right); \\
P_{6aL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( 6I_{ia_3} I_{ib_3} + 6I_{ia_1} I_{ib_5} + 6I_{ib_1} I_{ia_5} \right); \\
P_{6bL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( -3I_{ia_1}^2 + 3I_{ib_1}^2 - 6I_{ia_1} I_{ia_5} + 6I_{ib_1} I_{ib_5} \right); \\
P_{8aL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( 8I_{ia_3} I_{ib_5} + 8I_{ib_3} I_{ia_5} \right); \\
P_{8bL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( -8I_{ia_3} I_{ia_5} + 8I_{ib_3} I_{ib_5} \right); \\
P_{10aL_i} &= L_i \frac{\Omega}{2} \left( 10I_{ia_5} I_{ib_5} \right);
\end{aligned}$$

$$P_{10bL_i} = L_i \frac{\Omega}{2} \left( -5I_{ia_5}^2 + 5I_{ib_5}^2 \right),$$

где  $I_{iam} = I_{im} \cos(\varphi_{im})$ ,  $I_{ibm} = I_{im} \sin(\varphi_{im})$ ;  $m = 1, 3, 5$ ;  $i$  – индекс элемента соответствующей цепи (статорной, роторной, намагничивания).

Уравнения баланса мощностей при использовании трех гармоник напряжения и тока ( $m = n = 1, 3, 5$ ) примут вид:

$$\begin{aligned}
P_{0u} &= P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'/2}; \\
P_{2au} &= P_{2aR_1} + P_{2aR_\mu} + P_{2aR'/2} + P_{2aL_1} + P_{2aL_\mu} + P_{2aL'/2}; \\
P_{2bu} &= P_{2bR_1} + P_{2bR_\mu} + P_{2bR'/2} + P_{2bL_1} + P_{2bL_\mu} + P_{2bL'/2}; \\
P_{4au} &= P_{4aR_1} + P_{4aR_\mu} + P_{4aR'/2} + P_{4aL_1} + P_{4aL_\mu} + P_{4aL'/2}; \\
P_{4bu} &= P_{4bR_1} + P_{4bR_\mu} + P_{4bR'/2} + P_{4bL_1} + P_{4bL_\mu} + P_{4bL'/2}; \\
P_{6au} &= P_{6aR_1} + P_{6aR_\mu} + P_{6aR'/2} + P_{6aL_1} + P_{6aL_\mu} + P_{6aL'/2}; \\
P_{6bu} &= P_{6bR_1} + P_{6bR_\mu} + P_{6bR'/2} + P_{6bL_1} + P_{6bL_\mu} + P_{6bL'/2}; \\
P_{8au} &= P_{8aR_1} + P_{8aR_\mu} + P_{8aR'/2} + P_{8aL_1} + P_{8aL_\mu} + P_{8aL'/2}; \\
P_{8bu} &= P_{8bR_1} + P_{8bR_\mu} + P_{8bR'/2} + P_{8bL_1} + P_{8bL_\mu} + P_{8bL'/2}; \\
P_{10au} &= P_{10aR_1} + P_{10aR_\mu} + P_{10aR'/2} + P_{10aL_1} + \\ &+ P_{10aL_\mu} + P_{10aL'/2}; \\
P_{10bu} &= P_{10bR_1} + P_{10bR_\mu} + P_{10bR'/2} + P_{10bL_1} + \\ &+ P_{10bL_\mu} + P_{10bL'/2}.
\end{aligned}$$

Анализ приведенных уравнений баланса гармоник мгновенной мощности показывает, что для определения ЭМП АД с помощью Т-образной схемы замещения достаточно использовать три гармоники напряжения и тока, т. к. при этом получается 11 составляющих мгновенной мощности при 10 неизвестных схемы замещения: активное сопротивление ротора, индуктивности статора, ротора и контура намагничивания, а также составляющие гармоник токов ротора и контура намагничивания (при использовании трех гармоник напряжения и тока получается шесть неизвестных составляющих токов). Сопротивление статора  $R_1$  определяется заранее.

Таким образом, достоинством энергетического метода является большое количество идентификационных уравнений при небольшом количестве входных гармоник напряжения и тока, т. е. при  $N$  гармониках напряжения и тока можно получить  $4N-1$  идентификационных уравнений. При этом мгновенная мощность элемента определяется путем произведения напряжения (ЭДС) на элементе на ток, который протекает в рассматриваемом контуре. Таким образом, в системе идентификационных уравнений при наличии в схеме замещения активных сопротивлений, кроме знакопеременных составляющих мгновенной мощности, всегда присутствует уравнение постоянной составляющей мгновенной мощности.

При использовании сигналов напряжения и тока, приведенных на рис. 1, проведена оценка разности между величиной гармоник источника полигармонического напряжения и величиной гармоник мгновенной мощности на элементах схемы замещения АД в виде (табл. 1):

$$\Delta P_k = P_{ku} - (P_{kR_1} + P_{kR_\mu} + P_{kR'/2} + P_{kL_1} + P_{kL_\mu} + P_{kL'/2}).$$

**Таблица 1 – Оценка составляющих мгновенной мощности в уравнениях баланса**

Номер гармоники мгновенной мощности	Составляющая мгновенной мощности	$\Delta P_k$
0	постоянная	$3,702 \cdot 10^{-5}$
2	косинусная	$-1,257 \cdot 10^{-3}$
	синусная	$-1,45 \cdot 10^{-3}$
4	косинусная	$2,74 \cdot 10^{-3}$
	синусная	$-4,04 \cdot 10^{-3}$
6	косинусная	$1,241 \cdot 10^{-3}$
	синусная	$-3,675 \cdot 10^{-3}$
8	косинусная	$2,302 \cdot 10^{-3}$
	синусная	$2,41 \cdot 10^{-3}$
10	косинусная	$1,18 \cdot 10^{-5}$
	синусная	$4,813 \cdot 10^{-5}$

Из табл. 1 видно, что расхождение составляющих мгновенной мощности по различным гармоникам не превышает 0,01 % при использовании полигармонического питания.

Решение системы идентификационных уравнений при определении ЭМП АД возможно только с использованием численных методов. В настоящее время используются разнообразные численные методы, которые обладают различной скоростью сходимости, точностью определения глобального и локальных минимумов, различными подходами к выбору целевой функции и т. д. Задачу идентификации ЭМП АД с помощью энергетического метода можно отнести к классу задач, решения которых неустойчивы к изменениям исходных данных. Они характеризуются тем, что изменения исходных данных могут приводить к изменениям решений. Задачи подобного типа принадлежат к классу некорректно поставленных задач. При этом о точной системе известно лишь то, что для коэффициентов левой и правой частей системы уравнений выполняются неравенства:

$$|u' - u| \leq \delta, \quad (7)$$

где  $u$  – точное значение параметра;  $u'$  – приближенное значение параметра;  $\delta$  – заданная точность.

Систем с такими исходными данными, отвечающих условию (7), бесконечно много, и в рамках указанной погрешности  $\delta$  они трудно различимы. Поскольку вместо точной системы используется приближенная, то и решение такой системы также будет приближенным. Причем каждому элементу сис-

темы при заданных начальных условиях отвечает единственное решение из рассматриваемого пространства.

Задача решения приведенной системы уравнений идентификации ЭМП АД является некорректно поставленной, т. к. не выполняется одно или несколько условий [25-32]:

- для всякого элемента  $u$  существует решение  $z$  из рассматриваемого пространства;
- решение определяется однозначно;
- задача устойчива на рассматриваемом пространстве.

Возможность определения приближенных решений некорректно поставленных задач, устойчивых к малым изменениям исходных данных, основывается на использовании дополнительной информации относительно решения. Возможны различные типы дополнительной информации.

В первом случае дополнительная информация, носящая количественный характер, позволяет сузить класс возможных решений, например, до компактного множества, и задача становится устойчивой к малым изменениям исходных данных. Во втором случае для нахождения приближенных решений, устойчивых к малым изменениям исходных данных, используется лишь качественная информация о решении (например, информация о характере его гладкости).

Широко распространенным в вычислительной практике способом приближенного решения уравнения является метод подбора (метод квазирешений). Он состоит в том, что для элементов  $z$  некоторого заранее заданного подкласса возможных решений  $M$  в качестве приближенного решения берется такой элемент  $z_0$  из множества  $M$ , на котором невязка достигает минимума. Если уравнение имеет единственное решение, то элемент  $z_0$  определен однозначно. В случае множества решений необходимо ограничить множество возможных решений и использовать начальные приближения, которые лежат в области глобального минимума функционала. При этом выбранный метод поиска решений должен обеспечить максимальное приближение к искомому точному решению. Таким образом, целевая функция определяет решение систем нелинейных уравнений при заданном векторе начальных приближений путем поиска нулей или минимумов среднеквадратичной погрешности.

Наиболее часто используемыми методами решения систем нелинейных уравнений являются метод простой итерации, метод Ньютона и производные от этого метода, метод сопряженного градиента [27, 30-32]. Метод простой итерации легко реализуем и прост, но имеет ряд недостатков:

- неоднозначность при выборе целевой функции;
- медленная сходимость (линейная скорость сходимости);
- необходимость близких к истинному значению начальных приближений;
- уменьшение области сходимости с увеличением числа неизвестных;

– отсутствие решения, если исходные приближения лежат за пределами области сходимости.

Эти недостатки показывают невозможность использования метода при решении систем нелинейных уравнений при идентификации ЭМП АД.

Метод сопряженного градиента является наиболее эффективным для решения задач минимизации, причем скорость сходимости существенно зависит от точности вычисления градиента. Этот метод чувствителен к ошибкам, возникающим в процессе счета, и требует начальные условия при решении систем нелинейных уравнений.

Наиболее эффективным и одним из наиболее распространенных методов решения систем нелинейных уравнений является метод Ньютона, имеющий высокую скорость сходимости [30, 31]. К недостаткам метода можно отнести малую область сходимости и необходимость расчета производных. Поэтому зачастую полезно начинать поиск решения с помощью другого метода, а завершать быстрым уточнением полученного приближения по методу Ньютона. В случае, если целевая функция является квадратичной, то, независимо от начального приближения и степени овражности, с помощью метода Ньютона ее минимум находится за один шаг. Если же функция не квадратичная, но выпуклая, метод Ньютона гарантирует ее монотонное убывание от итерации к итерации. При минимизации овражных функций скорость сходимости метода Ньютона более высока по сравнению с градиентными методами. Это объясняется тем, что вектор не указывает направления в точку минимума функции, однако имеет большую составляющую вдоль оси оврага и значительно ближе к направлению на минимум функции, чем антиградиент. Существенным недостатком метода Ньютона также является зависимость сходимости для невыпуклых функций от начального приближения. Если начальные приближения находятся достаточно далеко от точки минимума, то метод может расходиться, т. е. при проведении итерации каждая следующая точка будет более удаленной от точки минимума, чем предыдущая. Сходимость метода, независимо от начального приближения, обеспечивается выбором не только направления спуска, но и величиной шага вдоль этого направления.

Решение приведенных уравнений является известной задачей и решается известными методами. В подавляющем большинстве случаев для решения систем нелинейных уравнений используются итерационные методы или методы Ньютона. В настоящее время получили развитие методы решения систем нелинейных уравнений, которые объединяют несколько методов и используют совершенные алгоритмы составления целевой функции и нахождения минимума и искомого параметров. В качестве таких методов могут выступать комбинированные методы (составные нелинейно-линейные методы, методы минимизации и т. д.).

При решении систем нелинейных уравнений в задачах идентификации ЭМП АД использовался численный метод квази-Ньютона. Использование более совершенных и современных методов позво-

лит уменьшить ошибку идентификации ЭМП АД при решении систем нелинейных уравнений.

С целью проверки работы энергетического метода на практике рассматривалась идентификация ЭМП АД типа 4АП100L4У3 с номинальной мощностью 4 кВт, типа АО51-4 – с номинальной мощностью 4,5 кВт. Паспортные данные АД приведены в табл. 2. Для АД типа 4АП100L4У3 ЭМП были выбраны заводские данные, для остальных АД – рассчитаны по Т-образной схеме замещения. Результаты идентификации ЭМП АД сведены в табл. 3, из которой видно, что погрешность не превышает 5 % для АД типа 4 А. Высокая погрешность для АД АО51-4 (до 15 %) объясняется тем, что сравнение найденных ЭМП проводилось с параметрами, рассчитанными с использованием паспортных данных. Параметры для первых двух АД определялись экспериментально, для вторых двух – на основании результатов моделирования. Достоверность идентифицированных ЭМП для АД определялась на основании совпадения кривой тока статора, измеренной и рассчитанной по определенным параметрам. Коэффициент детерминации при этом составил 0,98.

**Таблица 2 – Параметры асинхронных двигателей**

Параметр	Значение			
	4АП100	АО51-4	4А180М4	4А225М4
$P_n, кВт$	4	4,5	30	55
$U_n, В$	380	380/220	380	380
$I_{1n}, А$	8,7	16,3/9,4	62,4	100
$n_n, об/мин$	1420	1440	1472	1479
$\cos\phi$	0,84	0,85	0,89	0,9
$\eta$	0,84	0,855	0,91	0,925
$R_1, Ом$	1,35	0,98	0,12	0,059
$R_2', Ом$	1,38	0,835	0,063	0,033
$X_1, Ом$	2,123	2,602	0,24	0,189
$X_2', Ом$	2,129	2,551	0,423	0,308
$X_\mu, Ом$	77,24	43,222	9	8

**Таблица 3 – Ошибки идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей**

Типоразмер АД	Ошибки идентификации электромагнитных параметров, %			
	$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_\mu$	$\Delta L_2$
4АП100	4,17	1,25	0,74	1,37
АО51-4	4,395	7,97	14,01	6,42
4А180М4	3,818	4,96	6,223	3,857
4А225М4	3,061	5,701	6,959	5,018

Отклонения электромагнитных параметров сведены в табл. 3 и определялись выражениями:

$$\Delta R_i = \frac{R_i - R_i'}{R_i} \cdot 100\%;$$

$$\Delta L_i = \frac{L_i - L_i'}{L_i} \cdot 100\%;$$
(8)

где  $R_i, L_i$  – паспортные данные активных сопротивлений и индуктивностей соответствующих цепей;  $R_i', L_i'$  – определяемые значения активных сопротивлений и индуктивностей соответствующих цепей.

Для оценки численных методов решения системы уравнений были идентифицированы ЭМП для АД типа 4A225M4 (табл. 4). При этом рассматривались три численных метода решения уравнений: сопряженного градиента, Левенберга-Марквардта и квази-Ньютона. При идентификации ЭМП АД использовались три гармоники напряжения и тока, начальные приближения параметров рассчитывались на основе каталожных данных. Из табл. 4 видно, что при использовании численных методов сопряженного градиента и квази-Ньютона ошибки идентификации ЭМП не превышают 8 % и 7 % соответственно.

**Таблица 4 – Ошибки идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей**

Метод расчета	Ошибки идентификации электромагнитных параметров, %			
	$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_\mu$	$\Delta L_2$
Сопряженного градиента	3,061	5,801	7,959	5,118
Левенберга-Марквардта	10,464	36,42	5,565	38,50
Квази-Ньютона	3,061	5,701	6,959	5,018

С учетом изложенного ясно, что использование системы уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности на элементах схемы замещения и источнике полигармонического напряжения позволяет определять электромагнитные параметры электрических машин с заданной точностью.

При идентификации ЭМП АД вводились ограничения определения корней системы уравнений в виде:

$$R_{zad} - \Delta R < R_{rasch} < R_{zad} + \Delta R;$$

$$L_{zad} - \Delta L < L_{rasch} < L_{zad} + \Delta L,$$
(9)

где  $R_{rasch}, L_{rasch}$  – значения определяемых параметров;  $R_{zad}, L_{zad}$  – значения параметров, рассчитанных на основе каталожных данных;  $\Delta R, \Delta L$  – отклонения параметров  $R_{zad}, L_{zad}$ .

Известно, что выбор начальных значений параметров представляет собой весьма непростую задачу, так как поверхность отклика в области предполагаемого решения имеет сложный характер и система может иметь множество решений. В связи с этим целесообразно исследовать поверхности от-

клика в области предполагаемого решения методами планирования эксперимента для выяснения характера ее поведения. Это также даст необходимую информацию о целесообразности введения дополнительных ограничений на искомые ЭМП в виде неравенств. При идентификации электромагнитных параметров необходимо выполнение условия:

$$e^2 = \left( \frac{R_{2zad} - R_{2rasch}}{R_{2zad}} \right)^2 + \left( \frac{L_{1zad} - L_{1rasch}}{L_{1zad}} \right)^2 + \left( \frac{L_{\mu zad} - L_{\mu rasch}}{L_{\mu zad}} \right)^2 + \left( \frac{L_{2zad} - L_{2rasch}}{L_{2zad}} \right)^2 \rightarrow \min$$
(10)

где  $R_{2zad}, L_{1zad}, L_{\mu zad}, L_{2zad}$  – ЭМП АД, полученные из модели.

В качестве начальных условий решения уравнения необходимо брать паспортные данные исследуемого АД или электромагнитные параметры, полученные из опытов холостого хода и короткого замыкания. Эти данные возьмем в качестве центра плана. Построим ротатабельное центральное композиционное планирование (РЦКП-план) для четырех факторов и проведем компьютерный эксперимент для исходной системы уравнений. Интервал варьирования по каждому фактору составлял 50 % при введенных 50 % ограничениях ( $\Delta R = 0,5R_{zad}, \Delta L = 0,5L_{zad}$ ). При этом приняты следующие обозначения (табл. 5). Для каждого фактора рассчитаны диаграммы Парето. На рис. 3 в качестве примера приведена диаграмма для параметра  $L_\mu$ . Как показывает анализ стандартизованной диаграммы Парето, модель слабо чувствительна к изменению параметра  $R_2$  и сильно чувствительна к изменению параметра  $L_\mu$ .

Несмотря на полученные значения ошибок при построении модели, коэффициент детерминации значим и достаточно высок, поэтому модель пригодна для анализа. На рис. 4 представлен график поверхности функции отклика по параметру  $L_\mu$  в трехмерном пространстве при фиксировании всех остальных параметров на значениях центра плана. Как видно, поверхность отклика в окрестностях исследуемой точки имеет минимум. Из табл. 6 видно, что модель, согласно условию (10), имеет коэффициент детерминации выше 70 %.

**Таблица 5 – Обозначения входных и выходных данных**

Входные данные		Выходные данные	
Factor A	$\Delta R_2$	Var 1	$R_2$
Factor B	$\Delta L_1$	Var 2	$L_1$
Factor C	$\Delta L_\mu$	Var 3	$L_\mu$
Factor D	$\Delta L_2$	Var 4	$L_2$
		Var 5	$e^2$

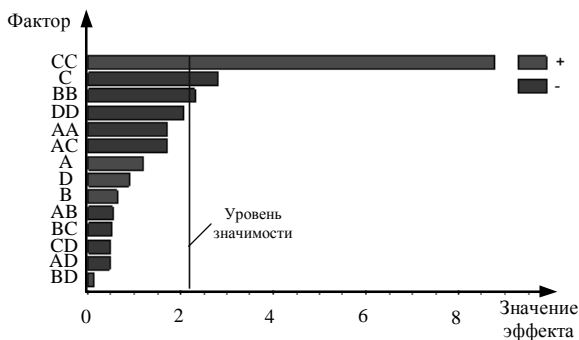


Рисунок 3 – Диаграмма Парето для параметра  $L_{\mu}$

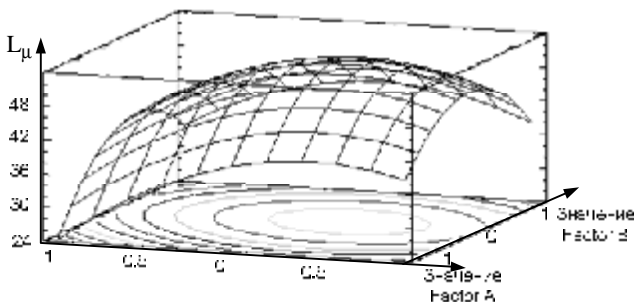


Рисунок 4 – Поверхность отклика по параметру  $L_{\mu}$

Применительно к рис. 4  $R^2=94,1254\%$ ,  $R^2$  (скорректированный с учетом степеней свободы) равен  $86,6486\%$ , стандартная ошибка модели равна  $9,50853$ .

**Таблица 6 – Значения модельных данных с учетом незначимых факторов**

Коэффициент детерминации, $R^2$ , %	Коэффициент детерминации (скорректированный с учетом степеней свободы), %	Стандартная ошибка модели
70,5971	69,372	0,226258
$e^2 = -0,111429 + 0,337839 \Delta L_{\mu}^2$		

При этом необходимо отметить, что нечувствительность к параметрам является, с одной стороны, предпосылкой для задания начальных условий, а с другой – это приводит к расширению области допустимых решений системы и, следовательно, к расширению диапазона возможных значений этого параметра и неоднозначности идентификации этого параметра. Кроме того, модель весьма чувствительна к изменению величин остальных параметров. Это приводит к обратной ситуации – сужению диапазона возможных решений системы, но при условии корректного задания начальных условий. Не исключено также наличие множества локальных минимумов в исследуемой области, так как параболическая аппроксимация в данном случае является достаточно грубой для детального исследования поверхности отклика. В связи с этим целе-

сообразно введение корректных ограничений на параметры для сужения спектра решений.

При этом идентифицировались ЭМП АД для различных начальных условий и различных ограничений. Введение ограничений и начальных приближений влияет на определяемые параметры АД и наибольшая ошибка наблюдается при нулевых начальных приближениях. Это связано с тем, что при решении системы нелинейных уравнений определение корней осуществляется путем поиска минимума функции, который определяется с заданной ошибкой (по умолчанию  $0,001$ ). При этом может быть, что численный метод определяет один из локальных минимумов и идентификация параметров проходит при найденном минимуме, хотя решение системы нелинейных уравнений необходимо проводить при найденном глобальном минимуме функции. Для идентификации ЭМП при глобальном минимуме необходимо задание начальных условий, которые будут ограничивать область поиска указанного минимума функции. Диапазон ограничения идентифицируемых параметров должен быть широк, т.к. при узком диапазоне некоторые из идентифицируемых параметров могут принять значение одного из ограничений.

По результатам опытов построены зависимости ошибок идентификации ЭМП при изменении величины ограничений идентифицируемых параметров. На рис. 5-8 кривая 1 соответствует изменению параметра при ограничении  $0 < \Delta$ , кривая 2 – при ограничениях параметров  $\pm 10\%$ , кривая 3 – при  $\pm 100\%$ . В табл. 7 показаны условия, в соответствии с которыми получены зависимости, приведенные на рис. 5-8. Значение «var» показывает, что ограничение по приведенному параметру изменяется от  $\pm 10\%$  до  $\pm 100\%$ . Анализ различных ограничений параметров показал, что эффективно вводить ограничения на уровне  $\pm 50\%$ .

**Таблица 7 – Значения ограничений параметров**

№ рисунка	Вводимые ограничения			
	$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_{\mu}$	$\Delta L_2$
4a	var	$0 <$	$0 <$	$0 <$
4б	$0 <$	var	$0 <$	$0 <$
4в	$0 <$	$0 <$	var	$0 <$
4г	$0 <$	$0 <$	$0 <$	var
5a	var	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
5б	$\pm 10\%$	var	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
5в	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	var	$\pm 10\%$
5г	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	var
6a	var	$\pm 100\%$	$\pm 100\%$	$\pm 100\%$
6б	$\pm 100\%$	var	$\pm 100\%$	$\pm 100\%$
6в	$\pm 100\%$	$\pm 100\%$	var	$\pm 100\%$
6г	$\pm 100\%$	$\pm 100\%$	$\pm 100\%$	var



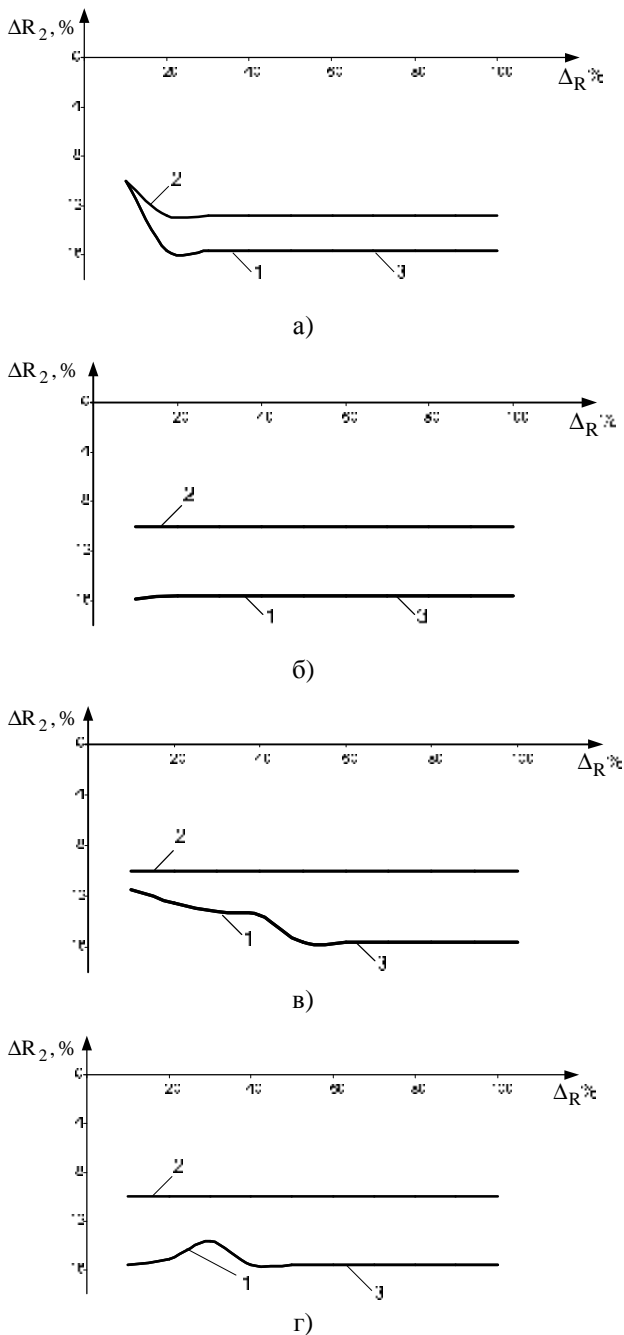


Рисунок 5 – Ошибки определения активного сопротивления ротора в зависимости от вводимых ограничений

Таким образом, при использовании численных методов решения уравнений необходимо вводить начальные приближения и ограничения. При решении идентификационных уравнений численным методом Ньютона, использовании начальных приближений электромагнитных параметров, полученных на основе каталожных данных, нулевых начальных приближений по составляющим гармоник токов ротора и контура намагничивания, задании симметричных ограничений на уровне 50 % для Т-образной схемы замещения при известном активном сопротивлении статора, погрешность идентификации ЭМП не превышает 7 %. Как отмечалось выше, использование комбинированных

численных методов решения идентификационных уравнений позволит увеличить точность определения параметров при отказе от введения ограничений и начальных приближений, которые получаются на основе каталожных данных или из опытов холостого хода и короткого замыкания.

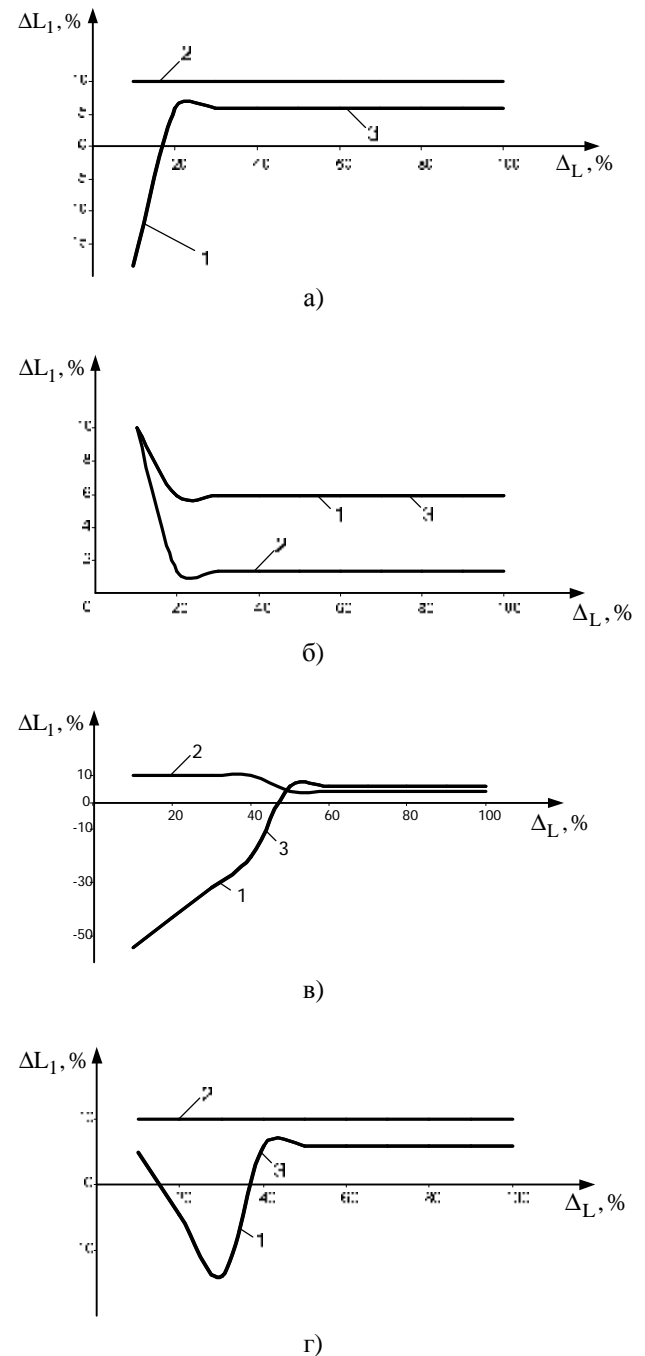


Рисунок 6 – Ошибки определения индуктивности статора в зависимости от вводимых ограничений

Энергетический метод может быть расширен за счет разделения канонических и неканонических составляющих при составлении уравнений энергобаланса. Для удобства именуем канонические составляющие мгновенной мощности –  $P_c$ , а неканонические составляющие –  $P_s$ .

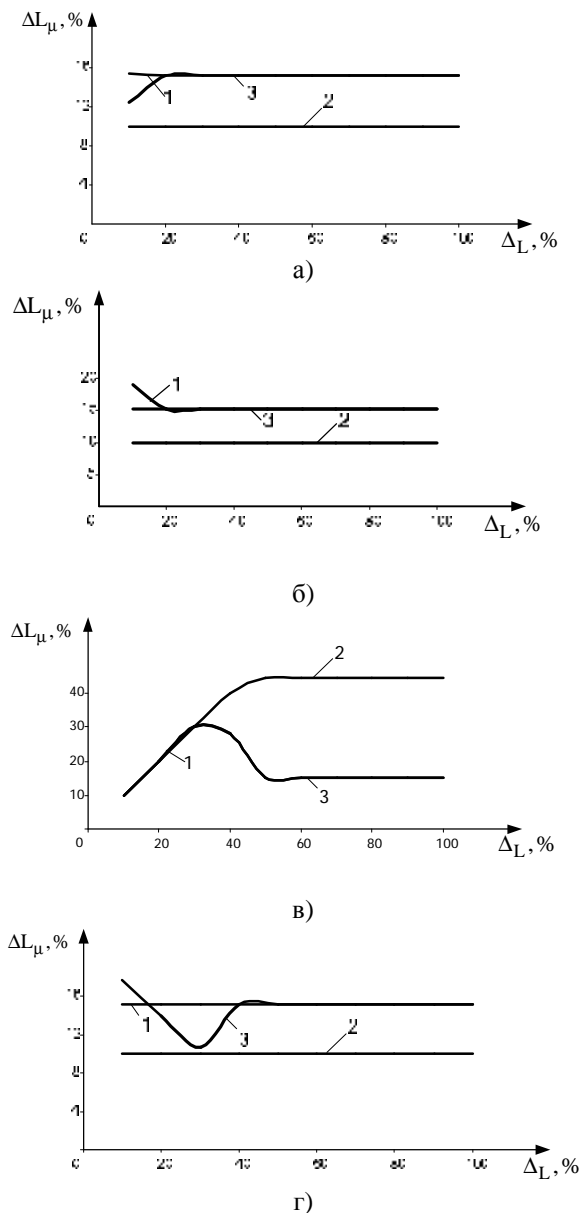


Рисунок 7 – Ошибки определения индуктивности контура намагничивания в зависимости от вводимых ограничений

Система уравнений баланса канонических составляющих гармоник мгновенной мощности:

$$\left. \begin{aligned} P_{0_c u} &= P_{0_c R_1} + P_{0_c R_\mu} + P_{0_c R'_2}; \\ P_{ka_c u} &= P_{ka_c R_1} + P_{ka_c R_\mu} + P_{ka_c R'_2} + \\ &+ P_{ka_c L_1} + P_{ka_c L_\mu} + P_{ka_c L'_2}; \\ P_{kb_c u} &= P_{kb_c R_1} + P_{kb_c R_\mu} + P_{kb_c R'_2} + \\ &+ P_{kb_c L_1} + P_{kb_c L_\mu} + P_{kb_c L'_2}. \end{aligned} \right\} (11)$$

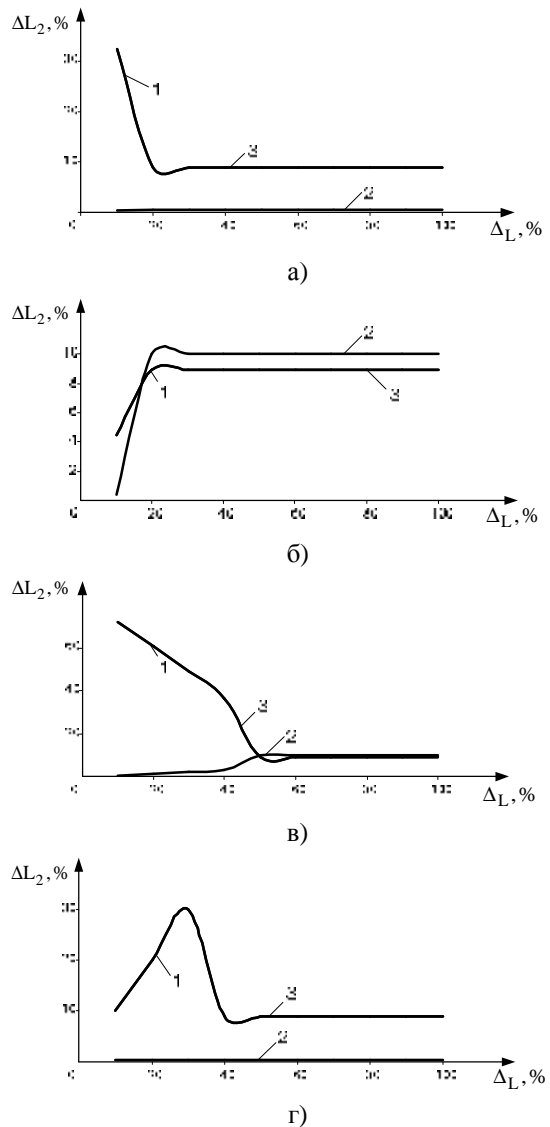


Рисунок 8 – Ошибки определения индуктивности ротора в зависимости от вводимых ограничений

Система уравнений баланса неканонических составляющих гармоник мгновенной мощности:

$$\left. \begin{aligned} P_{ka_s u} &= P_{ka_s R_1} + P_{ka_s R_\mu} + P_{ka_s R'_2} + \\ &+ P_{ka_s L_1} + P_{ka_s L_\mu} + P_{ka_s L'_2}; \\ P_{kb_s u} &= P_{kb_s R_1} + P_{kb_s R_\mu} + P_{kb_s R'_2} + \\ &+ P_{kb_s L_1} + P_{kb_s L_\mu} + P_{kb_s L'_2}. \end{aligned} \right\} (12)$$

Увеличение точности идентификации ЭМП достигается путем использования всех значимых гармоник напряжения и тока в уравнениях баланса составляющих гармоник мгновенной мощности. Однако при использовании большего числа гармоник напряжения и тока число идентификационных уравнений увеличивается. Это приводит к тому, что количество идентификационных уравнений превышает количество определяемых параметров. Поэтому необходимо рассмотреть, как влияют используемые составляющие мощности на идентифицируемые параметры. Для анализа возьмем пять гармоник на-

пряжения и тока (1, 3, 5, 7, 9). При использовании указанных гармоник составлено 19 идентификационных уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности:

$$\begin{aligned}
 P_{0u\Sigma} &= P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'/2}; \\
 P_{2au\Sigma} &= P_{2aR_1} + P_{2aR_\mu} + P_{2aR'/2} + P_{2aL_1} + P_{2aL_\mu} + P_{2aL'/2}; \\
 P_{2bu\Sigma} &= P_{2bR_1} + P_{2bR_\mu} + P_{2bR'/2} + P_{2bL_1} + P_{2bL_\mu} + P_{2bL'/2}; \\
 P_{4au\Sigma} &= P_{4aR_1} + P_{4aR_\mu} + P_{4aR'/2} + P_{4aL_1} + P_{4aL_\mu} + P_{4aL'/2}; \\
 P_{4bu\Sigma} &= P_{4bR_1} + P_{4bR_\mu} + P_{4bR'/2} + P_{4bL_1} + P_{4bL_\mu} + P_{4bL'/2}; \\
 P_{6au\Sigma} &= P_{6aR_1} + P_{6aR_\mu} + P_{6aR'/2} + P_{6aL_1} + P_{6aL_\mu} + P_{6aL'/2}; \\
 P_{6bu\Sigma} &= P_{6bR_1} + P_{6bR_\mu} + P_{6bR'/2} + P_{6bL_1} + P_{6bL_\mu} + P_{6bL'/2}; \\
 P_{8au\Sigma} &= P_{8aR_1} + P_{8aR_\mu} + P_{8aR'/2} + P_{8aL_1} + P_{8aL_\mu} + P_{8aL'/2}; \\
 P_{8bu\Sigma} &= P_{8bR_1} + P_{8bR_\mu} + P_{8bR'/2} + P_{8bL_1} + P_{8bL_\mu} + P_{8bL'/2}; \\
 P_{10au\Sigma} &= P_{10aR_1} + P_{10aR_\mu} + P_{10aR'/2} + P_{10aL_1} + P_{10aL_\mu} + P_{10aL'/2}; \\
 P_{10bu\Sigma} &= P_{10bR_1} + P_{10bR_\mu} + P_{10bR'/2} + P_{10bL_1} + P_{10bL_\mu} + P_{10bL'/2}; \\
 P_{12au\Sigma} &= P_{12aR_1} + P_{12aR_\mu} + P_{12aR'/2} + P_{12aL_1} + P_{12aL_\mu} + P_{12aL'/2}; \\
 P_{12bu\Sigma} &= P_{12bR_1} + P_{12bR_\mu} + P_{12bR'/2} + P_{12bL_1} + P_{12bL_\mu} + P_{12bL'/2}; \\
 P_{14au\Sigma} &= P_{14aR_1} + P_{14aR_\mu} + P_{14aR'/2} + P_{14aL_1} + P_{14aL_\mu} + P_{14aL'/2}; \\
 P_{14bu\Sigma} &= P_{14bR_1} + P_{14bR_\mu} + P_{14bR'/2} + P_{14bL_1} + P_{14bL_\mu} + P_{14bL'/2}; \\
 P_{16au\Sigma} &= P_{16aR_1} + P_{16aR_\mu} + P_{16aR'/2} + P_{16aL_1} + P_{16aL_\mu} + P_{16aL'/2}; \\
 P_{16bu\Sigma} &= P_{16bR_1} + P_{16bR_\mu} + P_{16bR'/2} + P_{16bL_1} + P_{16bL_\mu} + P_{16bL'/2};
 \end{aligned}$$

**Таблица 8 – Ошибки определения электромагнитных параметров**

№ п/п	Используемые гармоники напряжения и тока	Анализируемые гармоники мгновенной мощности	Ошибки определения параметров, %			
			$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_\mu$	$\Delta L_2$
1	1, 3, 5	0, 2, 4, 6, 8, 10	-6,416	2,595	-5,316	2,297
2	3, 5, 7	0, 2, 4, 6, 8, 10	-7,21	3,162	-5,814	2,351
3	5, 7, 9	0, 2, 4, 6, 8, 10	-8,441	3,241	-5,972	2,915
4	1, 5, 9	0, 2, 4, 6, 8, 10	-7,21	2,673	-5,724	2,337
5	1, 3, 5, 7, 9	0, 10, 12, 14, 16, 18	-8,497	5,112	-10,149	5,011
6	1, 3, 5, 7, 9	0, 6, 8, 10, 12, 14	-7,437	3,764	-6,948	3,497
7	1, 3, 5, 7, 9	8, 10, 12, 14, 16, 18	-15,34	5,486	-10,247	5,179
8	1, 3, 5, 7, 9	0, 6, 8, 10, 12, 14	-6,988	3,431	-5,931	3,241
9	1, 3, 5, 7, 9	0, 2, 4, 6, 8, 18	-6,164	2,715	-5,678	2,412

В качестве значимых гармоник напряжения и тока необходимо выбирать гармоники, порядок которых ближе к основной, т. е. первой. Это связано с тем, что порядок высокочастотных составляющих напряжения и тока составляет не более 1 % от основной.

Эффективность энергетического метода оценим путем влияния высокочастотных составляющих напряжения и тока на идентифицируемые параметры. Для анализа рассмотрим первых пять значащих гармоник напряжения и тока: 1, 3, 5, 7, 9. При этом будем определять параметры при использовании ком-

$$\begin{aligned}
 P_{18au\Sigma} &= P_{18aR_1} + P_{18aR_\mu} + P_{18aR'/2} + P_{18aL_1} + P_{18aL_\mu} + P_{18aL'/2}; \\
 P_{18bu\Sigma} &= P_{18bR_1} + P_{18bR_\mu} + P_{18bR'/2} + P_{18bL_1} + P_{18bL_\mu} + P_{18bL'/2};
 \end{aligned}$$

причем уравнения для постоянной составляющей расписаны в виде:

$$\begin{aligned}
 P_{0u(1)} &= P_{0R_1(1)} + P_{0R_\mu(1)} + P_{0R'/2(1)}; \\
 P_{0u(3)} &= P_{0R_1(3)} + P_{0R_\mu(3)} + P_{0R'/2(3)}; \\
 P_{0u(5)} &= P_{0R_1(5)} + P_{0R_\mu(5)} + P_{0R'/2(5)}; \\
 P_{0u(7)} &= P_{0R_1(7)} + P_{0R_\mu(7)} + P_{0R'/2(7)}; \\
 P_{0u(9)} &= P_{0R_1(9)} + P_{0R_\mu(9)} + P_{0R'/2(9)},
 \end{aligned}$$

где индекс в скобках указывает на используемые гармоники напряжения и тока при получении постоянной составляющей мощности (например, «1» соответствует произведению первой гармоники напряжения и первой гармоники тока).

При идентификации ЭМП АД для рассматриваемых начальных приближений и ограничений использовались идентификационные уравнения с номерами гармоник мгновенной мощности, приведенными в табл. 8, из которой видно, что максимальная погрешность идентификации электромагнитных параметров наблюдается при использовании высокочастотных гармоник мгновенной мощности и составляет более 15 %. Столь высокая погрешность объясняется тем, что эти составляющие мощности определяются компонентами напряжений и токов высоких порядков, т. е. 5, 7, 9. Например, составляющая мгновенной мощности 18 порядка определяется только 9-ми гармониками напряжения и тока.

бинаций только трех гармоник напряжения и тока, приведенных в табл. 8. Результаты идентификации электромагнитных параметров при использовании указанных гармоник, уравнений мгновенной мощности и ограничений приведены в табл. 8, из которой видно, что наибольшая точность при идентификации электромагнитных параметров наблюдается при использовании наиболее значимых гармоник напряжения и тока, т. е. 1, 3, 5. Это объясняется тем, что 3 и 5 гармоники напряжения и тока составляют до 10-15 % от основной гармоники, и они определяются с достаточной точностью. Погрешности при

определении составляющих напряжения и тока возникают при разложении сигналов в ряд Фурье. Уровень 7, 9 и т. д. гармоник существенно ниже, поэтому ошибка их определения может быть соизмерима с величиной самой гармоники. К тому же при идентификации электромагнитных параметров использовались 0, 2, 4, 6, 8, 10 гармоники мощности, которые в основном определяются гармониками напряжения и тока с номерами 1, 3, 5.

Исходя из системы идентификационных уравнений видно, что при анализе пяти гармоник напряжения и тока можно получить дополнительно четыре идентификационных уравнения. Результаты идентификации ЭМП АД сведены в табл. 9. Анализ показывает, что разделение уравнений по постоянной составляющей не сказывается существенно на результатах идентификации, но позволяет увеличить количество идентификационных уравнений на  $N-1$ , где  $N$  – количество анализируемых гармоник напряжения и тока.

**Таблица 9 – Ошибки идентификации электромагнитных параметров при разделении уравнений по постоянной составляющей**

Разделение уравнений по постоянной составляющей	Ошибки идентификации электромагнитных параметров, %			
	$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_2$	$\Delta L_3$
Отсутствует	-6,22	2,512	-4,913	2,214
Выполнено	-4,75	2,534	-5,348	2,267

Для существующих методов идентификации ЭМП АД необходимо наличие специального оборудования для проведения процедуры диагностики, наличие которого увеличивает стоимостные показатели системы. Поэтому возникла необходимость использования псевдополигармонического питания обмоток статора АД [33]. Особенность псевдополигармонического питания заключается в том, что на обмотки статора АД подается синусоидальное напряжение промышленной частоты, измеряются сигналы напряжения и тока, выполняется разложение в ряд Фурье сигналов не на периоде сетевого напряжения, а на меньшем или большем периоде.

Для получения псевдополигармонического питания необходимо модифицировать исходные синусоидальные сигналы напряжения и тока (рис. 9). При этом можно рассмотреть несколько частных случаев. Первый случай соответствует рассмотрению анализируемых сигналов напряжения и тока (рис. 9) до периода  $T'$  (рис. 10, а). Причем разложение в ряд Фурье можно выполнять как для периода модифицированного сигнала, так и для периода сетевого напряжения. Недостатком является то, что появляется постоянная составляющая в анализируемых сигналах напряжения и тока. Во избежание этого модифицированный сигнал дополняют сигналами, изображенными на рис. 10, б - г.

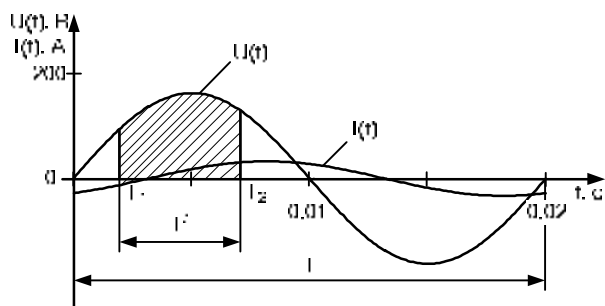


Рисунок 9 – Синусоидальные сигналы напряжения и тока

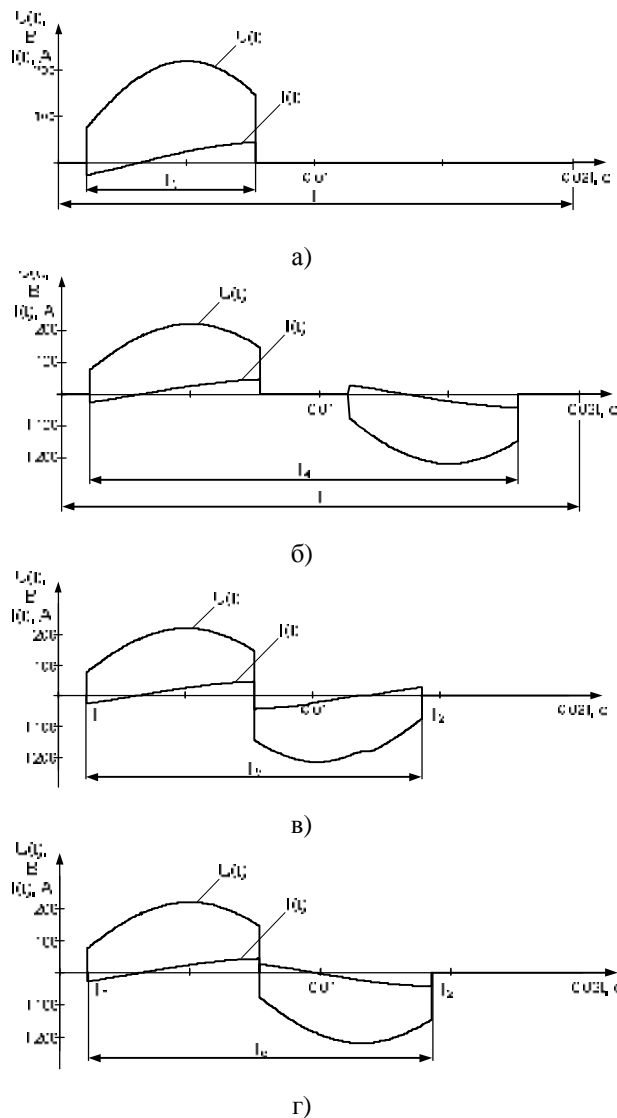


Рисунок 10 – Модифицированные сигналы напряжения и тока

Возможно также усечение анализируемых сигналов напряжения и тока симметрично, т.е. слева и справа сигналы усекаются на равные углы (рис. 11).

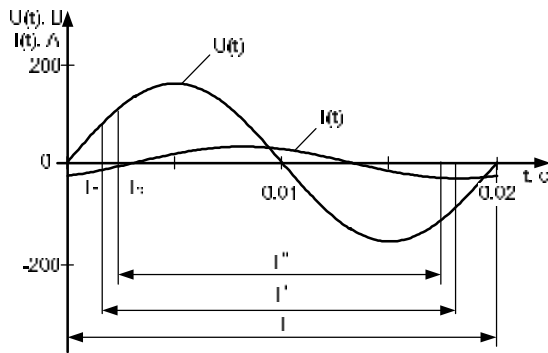


Рисунок 11 – Анализируемые сигналы напряжения и тока

Оценку эффективности применения псевдополигармонического питания проведем для АД серии 4АП100L4У3 с номинальными параметрами, приведенными в табл. 2. Для этого путем математического моделирования указанного АД при питании от синусоидального напряжения были измерены

сигналы напряжения и тока для периода  $T = 0,02$  с (рис. 11). При идентификации ЭМП использовалась T-образная схема замещения.

Сигналы напряжения и тока на гармониках могут быть получены при анализе указанных сигналов на периоде, отличном от сетевого. При этом анализировались два периода:  $T' = T - 2T_1$  и  $T'' = T - 2T_2$ , где  $T_1 = \pi/6$ ,  $T_2 = \pi/4$ .

Рассмотрим оценку параметров для двух случаев:

– период сигнала равен  $T'$  или  $T''$  соответственно, а период разложения фиксированный и равный  $T_r = T$ ;

– периоды сигналов напряжения и тока равны периодам разложения, т. е.  $T_r = T'$ ;  $T_r = T''$ .

Результаты идентификации электромагнитных параметров АД сведены в табл. 10.

Таким образом, ошибки идентификации ЭМП АД для T-образной СЗ при усеченном периоде напряжения и тока не превышают 9 %.

Таблица 10 – Ошибки идентификации электромагнитных параметров

№ п/п	Период сигнала	Период разложения	Ошибки идентификации электромагнитных параметров, %			
			$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_\mu$	$\Delta L_2$
1	$T'$	$T$	0,75	7,41	14,94	7,24
2	$T'$	$T'$	0,57	5,01	8,68	4,13
3	$T''$	$T$	0,75	7,37	14,57	7,21
4	$T''$	$T''$	0,54	5,13	8,47	5,10

Особенностью псевдополигармонического питания, как уже отмечалось, является то, что подается синусоидальное напряжение на АД, измеряются при этом напряжение и ток статора и записываются в виде тригонометрических рядов с помощью преобразования Фурье. Полученные сигналы напряжения и тока рассматриваются не на периоде повторяемости, а на меньшем периоде  $T' < T = 2\pi/\Omega$ . Результаты идентификации ЭМП АД при периоде разложения  $T_r = T$  и периоде сигнала  $T' < T$  представлены в табл. 11. Вначале были определены ЭМП для случая, когда период сигнала  $T'$  меньше периода сетевого напряжения, который равен периоду разложения  $T = T_r = \frac{2\pi}{\Omega}$ . При этом период  $T'$  изменялся в диапазоне  $0,9T..0,1T$ . Полученные зависимости ошибок идентификации ЭМП АД в функции от рассматриваемого периода сигнала показаны на рис. 12 - 15. Анализ результатов идентификации ЭМП АД показал, что при уменьшении периода сигнала с фиксированным периодом разложения растет погрешность. Так, например, при рассмотрении периодов сигнала  $0,1T$  ошибка идентификации ЭМП

АД составляет порядка 100 % при определении индуктивности контура намагничивания.

Ввиду значительных погрешностей при использовании фиксированного периода разложения, далее период разложения был выбран равным периоду рассматриваемого сигнала, т.к. одним из свойств рядов является возможность разложения сигнала на любом периоде. При этом, имея синусоидальное питание на входе, можно получить полигармонические сигналы напряжения и тока после преобразования Фурье, т. е. использовать так называемое псевдополигармоническое питание. Период разложения в этом случае выбирается равным периоду сигнала  $T_r = T$  и отличным от периода сетевого напряжения  $2\pi/\Omega$ . Для этого случая синусоидальные сигналы напряжения и тока рассматривались на периоде  $T' < T = 2\pi/\Omega$  и были определены электромагнитные параметры АД (рис. 16 – 19, табл. 12). При этом из полученных зависимостей ошибок идентификации ЭМП АД видно, что погрешность изменяется в небольшом диапазоне и остается величиной практически постоянной. Это связано с тем, что при рассмотрении части сигнала с выбранным периодом разложения соблюдается баланс мощности.

**Таблица 11 – Ошибки идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей**

№ п/п	Период сигнала, с	Период разложения, с	Ошибки определения параметров, %			
			$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_\mu$	$\Delta L_2$
1	0,018	0,02	0,36	4,79	14,76	4,1
2	0,016	0,02	0,582	4	14,79	4,4
3	0,014	0,02	0,47	6,3	16,7	6,1
4	0,012	0,02	0,51	8,4	18,7	8,1
5	0,01	0,02	0,5	12,4	17,3	12,2
6	0,008	0,02	1	14,13	16,7	15,1
7	0,006	0,02	1,3	16,7	27,1	15,7
8	0,004	0,02	1,841	18,4	47,3	17,4
9	0,002	0,02	2,68	21,3	100	19,6

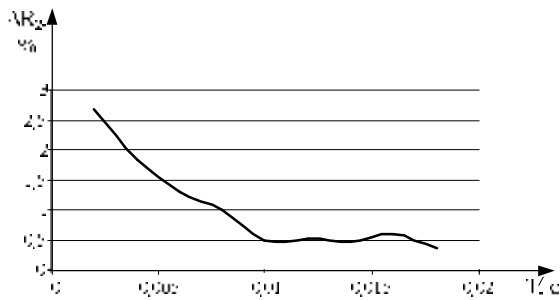


Рисунок 12 – Зависимость  $\Delta R_2=f(T')$

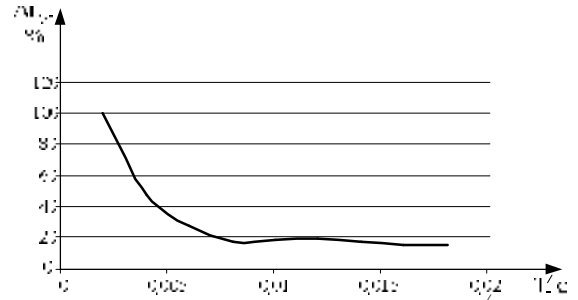


Рисунок 14 – Зависимость  $\Delta L_\mu=f(T')$

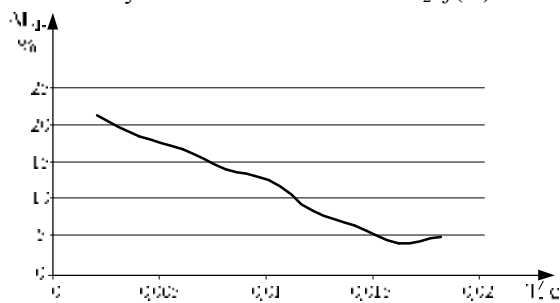


Рисунок 13 – Зависимость  $\Delta L_1=f(T')$

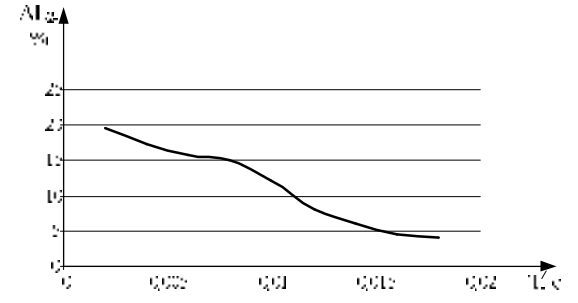


Рисунок 15 – Зависимость  $\Delta L_2=f(T')$

**Таблица 12 – Ошибки идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей**

№ п/п	Период сигнала, с	Период разложения, с	Ошибки определения параметров, %			
			$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_\mu$	$\Delta L_2$
1	0,018	0,018	0,834	3,6	14,646	4,1
2	0,016	0,016	0,748	5,1	14,868	4,4
3	0,014	0,014	0,768	7,77	15,587	6,1
4	0,012	0,012	0,84	9,04	15,921	8,1
5	0,01	0,01	0,814	8,68	16,229	12,2
6	0,008	0,008	0,892	9,97	16,5	15,1
7	0,006	0,006	1,031	10,85	16,461	15,7
8	0,004	0,004	1,055	9,66	16,469	17,4
9	0,002	0,002	0,85	9,2	16,1	19,6

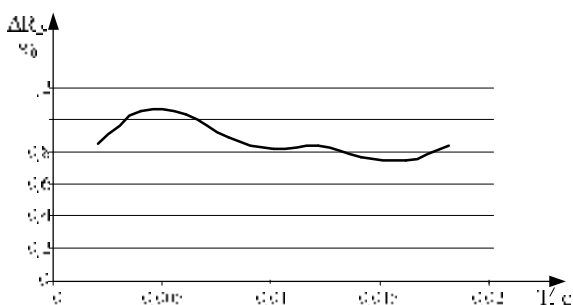


Рисунок 16 – Зависимость  $\Delta R_2=f(T')$

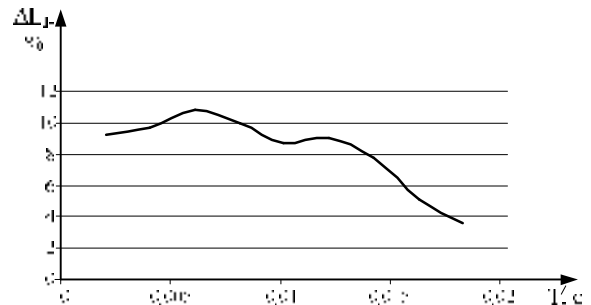


Рисунок 17 – Зависимость  $\Delta L_1=f(T')$

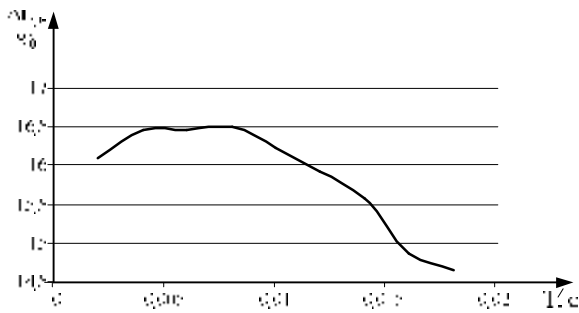


Рисунок 18 – Зависимость  $\Delta L_{\mu} = f(T)$

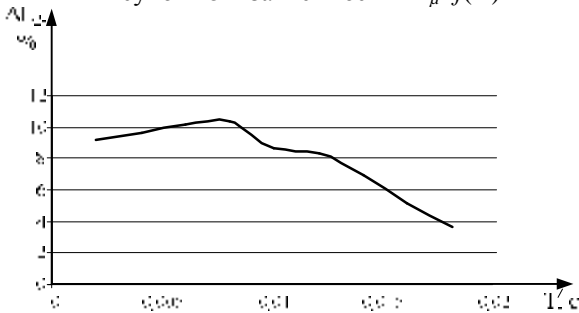


Рисунок 19 – Зависимость  $\Delta L_2 = f(T)$

**Выводы.** Исходя из вышеизложенного следует:

- энергетический метод базируется на уравнениях баланса составляющих гармоник мгновенной мощности, которые отвечают закону сохранения энергии, и используется при идентификации электромагнитных параметров схем замещения асинхронных двигателей и других электрических и электромеханических систем;
- полученные результаты при идентификации ЭМП АД при псевдополигармоническом питании показывают, что ошибки определения параметров не превышают 17 % при использовании синусоидального питания при периоде разложения равным периоду сигнала;
- при идентификации параметров АД необходимо использовать численный метод решения систем нелинейных уравнений, который обладает высокой сходимостью, и определять параметры АД при найденном глобальном минимуме функции;
- с целью увеличения точности решения системы идентификационных уравнений необходимо вводить начальные приближения, которые могут быть рассчитаны на основании каталожных данных или из опытов холостого хода и короткого замыкания;
- необходимо вводить ограничения на определяемые параметры в виде диапазона, в котором они изменяются;
- анализ полученных результатов при псевдополигармоническом питании свидетельствует о целесообразности использования части периода сигналов напряжения и тока, причем необходимо выбирать период разложения равный периоду сигнала. Симметричное уменьшение периода сигнала позволяет получить более приемлемые результаты, чем простое уменьшение сигнала;
- увеличение точности идентификации ЭМП АД достигается путем формирования системы иден-

тификационных уравнений отдельно по постоянным, одночастотным и разночастотным составляющим мгновенной мощности;

– разработанный метод зависит от уровней гармоник напряжения и тока, формирующих составляющие гармоник мгновенной мощности.

Недостатки энергетического метода:

– необходимость использования начальных приближений, которые могут быть получены из каталожных данных или из опытов холостого хода и короткого замыкания;

– необходимость ограничений определяемых параметров слева и справа от искомого значения на уровне 50 %.

Значит, необходима модернизация метода решения уравнений с целью отказа от задания начальных приближений и ограничений определяемых параметров.

Таким образом, энергетический метод позволяет определять электромагнитные параметры при полигармоническом и псевдополигармоническом питании обмоток статора АД. При этом при использовании полигармонического питания погрешность определения электромагнитных параметров для Т-образной схемы замещения не превышает 7 %. При использовании псевдополигармонического питания погрешность идентификации параметров зависит от выбранного периода сигнала и периода разложения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д. И. Результаты исследований по диагностике параметров асинхронных двигателей при полигармоническом питании / Д. И. Родькин // Вестник КГПУ. – Кременчуг, 2001. – Вып. 1.
2. Родькин Д. И. Экспериментальное определение показателей энергопроцессов по параметрам мгновенной мощности / [Родькин Д. И., Резник Д. В., Ведмидь Д. С, Шлык А. В. ]. // Інформаційні системи та моделювання. Сб. наукових робіт КДПУ. – Кременчук, 2004. – Вип. 3(26). – С. 140-147.
3. Родькин Д. И. Особенности анализа энергопроцессов в цепях с полигармоническим током и напряжением / Д. И. Родькин // Вестник КГПИ. – Кременчуг, 1992. – Вып. 2, – ч. 1. – С. 2-18.
4. Родькин Д. И. Преобразование мощности в источниках полигармонического питания / Д. И. Родькин, В. В. Заквасов, Ю. В. Ромашихин // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ. – Кременчук, 2004. – Вип. 3(26). – С. 191-200.
5. Родькин Д. И. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока / Д. И. Родькин, А. П. Калинов, Ю. В. Ромашихин // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ. – Кременчук, 2005. – Вип. 3(33). – С. 43-47.
6. Родькин Д. И. Оценка эффективности метода идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей при использовании уравнений баланса мощностей / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2008. – Вип. 6(53), ч. 2. – С. 35-39.

7. Родькин Д. И. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока / Д. И. Родькин, А. П. Калинов, Ю. В. Ромашихин // Электроприводы переменного тока: Труды Международной четырнадцатой НТК. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет - УПИ», 2007. – С. 273-278.
8. Ромашихин Ю. В. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей / Ю. В. Ромашихин, Д. И. Родькин, А. П. Калинов // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ. – Кременчук, 2007. – Вип. 3(44). – С. 130-136.
9. Родькин Д. Й. Оцінка складових миттєвої потужності полігармонійних сигналів / Д. Й. Родькин // Електроінформ. – Львів, 2003. – № 3. – С. 13-15.
10. Ромашихин Ю. В. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей / Ю. В. Ромашихин, Д. И. Родькин, А. П. Калинов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2007. – Вип. 3(44). – С. 130-136.
11. Ромашихин Ю. В. Оценка эффективности метода определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя по полным уравнениям мгновенной мощности / Ю. В. Ромашихин // Тези доповідей п'ятої всеукр. науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”. Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 74-75.
12. Родькин Д. И. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин // XIV Міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск, 2007. – С. 507-512.
13. Родькин Д. И. Энергодиагностика асинхронных машин / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ ім. М.Остроградського. – Кременчук, 2010. – Вип. 3(62), ч. 2. – С. 128-137.
14. Родькин Д. И. Оценка составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов / Д. И. Родькин // Електроінформ. – Киев, 2003. – № 3. – С. 13-15.
15. Родькин Д. И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов / Д. И. Родькин // Електротехніка. – 2003. – № 3. – С. 34-37.
16. Родькин Д. Й. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током / Д. Й. Родькин, А. В. Бялобржеский, А. И. Ломонос // Електротехніка, 2004. – № 6. – С. 37-42.
17. Родькин Д. И. Комментарии к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами / Д. И. Родькин // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2004. – С. 10-18.
18. Зевеке Г. В. Основы теории цепей / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С.В. Страхов]. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
19. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник [для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. – 7-е изд., перераб. и дополненное] / Бессонов Л. А. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
20. Тонкаль В. Е. Баланс энергий в силовых цепях / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др. – Киев: Наукова думка, 1992. – 312 с.
21. Родькин Д. И. О балансе мощности в задачах диагностики электромеханических систем / Д. И. Родькин // Проблемы автоматизированного электропривода. Вестник ХПИ. – Харьков, 2004. – Вип. 43. – С. 166-169.
22. Родькин Д. И. Уравнения баланса составляющих мгновенной мощности / Д. И. Родькин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2006. – Вип. 4(39), ч. 1. – С. 92-98.
23. Родькин Д. И. Мгновенная мощность нелинейных элементов электрической цепи / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин // XIV Міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск, 2007. – С. 501-506.
24. Мгновенная мощность сложных электрических цепей / [Родькин Д. И., Ромашихин Ю. В., Калинов А. П. и др.] // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2008. – Вип. 3-4(4). – С. 11-25.
25. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 142 с.
26. Ракитин В. И. Практическое руководство по методам вычислений / В. И. Ракитин, В. Е. Первушин. – М.: Высшая школа, 1998. – 383 с.
27. Ортега Дж. М. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / Дж. М. Ортега, В. С. Рейнбольдт. – М.: Мир, 1975. – 560 с.
28. Морозов В. А. Регулярные методы решения некорректно поставленных задач / В. А. Морозов. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 360 с.
29. Методы вычислений на ЭВМ: Справочное пособие / Иванов В. В. – Киев: Наук. думка, 1986. – 584 с.
30. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 1987. – 630 с.
31. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука. – 508 с.
32. Заварькин В. М. Численные методы / В. М. Заварькин, В. Г. Житомирский, М. П. Лапчик. – М.: Просвещение, 1991. – 176 с.
33. Родькин Д. И. Особенности применения энергетического метода идентификации двигателей переменного тока при псевдополигармонических сиг-



налах / Д. И. Родькин // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. – Вип. 1(5). – Кременчук: КДПУ ім. М.Остроградського, 2009. – С. 7-20.

34. Родькин Д. И. Особенности использования метода энергодиагностики / Д. И. Родькин, Г. Н. Кожушок // Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков, 2002. – Т. 2. – С. 526-531.

35. Родькин Д. И. Терминологические понятия при использовании аппарата мгновенной мощности / Д. И. Родькин // Труды Луганского отделения Международной Академии информации. – Луганск, 2005. – № 1(10). – С. 145-154.

36. Родькин Д. И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии / Д. И. Родькин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2003. – Вип. 1. – С. 80-85.

37. Лейко В. В. Спектральный анализ мгновенной мощности в сети с полигармоническим напряжением и током / В. В. Лейко, Ю. В. Ромашихин // Тези доповідей четвертої Всеукр. науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”. – Кременчук: КДПУ, 2006. – С. 68-69.

38. Калинов А. П. Вентильные схемы для диагностики машин переменного тока / А. П. Калинов, Ю. В. Ромашихин // XII Міжнар. наук.-техн. конф.

“Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. Вісник НТУ “ХП”. Зб. наук. праць. – Харків, 2005. – № 45. – С. 459-462.

39. Автоматизація розрахунку складових миттєвої потужності електричних сигналів / [Сидоренко В. М., Родькин Д. Й., Чорний О. П., Мамчур Д. Г.]. // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2004. – Вип. 3(26). – С. 91-96.

40. Родькин Д. И. Оценка эффективности методов диагностики двигателей переменного тока / Д. И. Родькин, А. П. Калинов, Ю. В. Ромашихин // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ. – Кременчук, 2006. – Вип. 3(38). – С. 77-82.

41. Ромашихин Ю. В. Методы определения параметров машин переменного тока / Ю. В. Ромашихин, Д. И. Родькин // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2010. – Вип. 4(63), ч. 3. – С. 140-143.

Стаття надійшла 25.11.2010 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Кореньковою Т.В.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ РІШЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

*Родькин Д.И., д.т.н., проф., Ромашихин Ю.В., ас.*

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Першотравнева, 20, 39600 м., Кременчук, Україна*

*E-mail: romashihin\_yuriy@mail.ru*

Розглянуто енергетичний метод ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів, який базується на системі рівнянь балансу складових миттєвої потужності. Проаналізовано чисельні методи вирішення системи нелінійних рівнянь енергетичного методу, обґрунтовано вибір початкових наближень та обмежень при вирішенні рівнянь. Показано особливість енергетичного методу при використанні полігармонійного та псевдополігармонійного живлення. Розглянуто ефективність енергетичного методу при ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів.

**Ключові слова:** енергетичний метод, рівняння балансу потужностей, складові миттєвої потужності, електромагнітні параметри асинхронних двигунів.

## RESEARCH OF THE ENERGY METHOD DECISIONS REGION TO IDENTIFICATION ELECTROMAGNETIC PARAMETERS INDUCTION MOTORS

*Rodkin D., Doc. Sc. (Tech.), Prof., Romashihin Y., ass.*

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*

*vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchug, Ukraine*

*E-mail: romashihin\_yuriy@mail.ru*

In article is considered energy method to identifications electromagnetic parameter induction motors, based on system of the equations of the balance forming instant power. Will analysed numerical methods of the decision of the system of the nonlinear equations of the energy method, is motivated choice of the initial approach and possible restrictions at decision of the equations. Particularity of the energy method is shown when use polyharmonic and pseudopolyharmonic of the power supply. Considered efficiency of the energy method at identifications electromagnetic parameter induction motors.

**Key words:** energy method, equations of the balance of the powers, forming instant power, electromagnetic parameters of the induction motors.