

О РАЗДЕЛЕНИИ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Введение. В передовых в научном и техническом отношении странах обнародованы долгосрочные программы повышения эффективности использования энергии, применения альтернативных и возобновляемых источников энергии, внедрение в системы транспорта тягового электропривода и др. Эти программы получили название программ энергетической революции. Их никоим образом нельзя отнести к категории амбициозных, невыполнимых. Это реальные, базирующиеся на фундаменте новейших технических разработок, эффективных технологий, направлений развития техники, прикладных исследований программы. Энергетическая революция позволит подняться цивилизации на новый более безопасный уровень. Энергетическая революция – широчайший спектр разработок и исследований, которые должны обеспечить более эффективное энергоиспользование как в передовых странах, так и в странах с развивающейся, переходной экономикой [1].

В настоящее время существенное внимание уделяется вопросам идентификации параметров электрических машин, оценивания их рабочих характеристик применительно к тем случаям, когда параметры агрегатов изменились по эксплуатационным, климатическим причинам. В ряду решаемых задач до сих пор находится специфическая задача определения потерь в стали – основного конструкционного материала с меняющимися в процессе эксплуатации характеристиками. Определение общих потерь является, по существу, частью общей задачи исследования потерь в стали, так как важными являются ряд вопросов, кажущихся на первый взгляд второстепенными [2]:

- представляется важной оценка временной зависимости потерь в стали для идентификации параметров электрической машины путем использования аппарата мгновенной мощности. Использование мгновенной мощности для задач идентификации позволит существенно улучшить точность оценивания электромагнитных параметров электромашинных преобразователей [3];

- в зависимости от характера физических процессов в электротехнической стали разделяют общие потери в стали на гистерезисные потери и потери от вихревых токов. Знание общих потерь также важно, как и знание отдельных составляющих. Это обусловлено тем, что во вращающихся машинах гистерезисные потери, связанные с перемагничиванием стали, в основном располагаются более или менее равномерно по глубине пакета. Потери от вихревых токов с одной стороны сосредотачиваются внутри листа при хорошей изоляции между ними, а с другой – по телу и периферии пакета стали при наличии дефектов изоляции между листами или в случае замыкания между ними на периферии зубцовой зоны;

- условия охлаждения разных участков пакета отличаются друг от друга; в этой связи знание составляющих общих потерь представляет непосредственную ценность при решении задач, связанных с определением ресурса находящихся в эксплуатации электрических машин;

- важно отметить и такое обстоятельство. По мнению специалистов, в ближайшие годы будет постепенно расширяться сфера применения электрических машин и приводов нового поколения – индукторных электрических машин и индукторного регулируемого электропривода. Особенность электрических машин этого класса в том, что на роторе вообще не располагаются какие бы то ни было силовые обмотки или обмотки возбуждения. Ротор представляет собой конструкцию из электротехнической стали с расчетным количеством сформированных в процессе штамповки полюсов. Потери мощности в роторе – лишь потери в стали, обусловленные явлениями гистерезиса и вихревых токов. Именно по этой причине, а также из-за разных условий охлаждения разных частей ротора оценка суммарных потерь (а также их составляющих) представляет несомненную важность при решении практических задач создания индукторного электропривода.

Постановка задачи исследования. Разделение потерь как инженерно-техническая процедура используется в электромеханике в тех случаях, когда из общих потерь в электрической машине выделяются те, от которых в основном зависит температура изоляции – потери в меди и потери в стали. Другие виды потерь, в частности механические, влияют на температурный режим изоляции незначительно, вследствие чего их выделяют из общих потерь, оставляя так называемые «греющие потери». Это позволяет более точно определить тепловые характеристики и долговечность двигателей. В нашем случае осуществляется разделение потерь в стали на две известные составляющие: на гистерезисные потери и потери от вихревых токов [2]. Потери указанных видов отличаются друг от друга не только характером физических процессов, сопутствующих им, но, что более важно, имеют существенно отличные зависимости от частоты, индукции. Так, вихревые потери резко возрастают с ростом индукции, в то время как гистерезисные сравнительно медленно возрастают при насыщении стали [5].

Операции разделения, естественно, предшествует определение суммарных потерь в стали. Определение общих потерь в стали и их составляющих важно в тех случаях, когда двигатели долгое время находились в эксплуатации или прошли комплекс ремонтных, послеаварийных восстановительных операций. В том и другом

случае общие потери существенно возрастают, что негативно сказывается на работоспособности электрической машины. С другой стороны, появление дефектов в стали приводит к перераспределению потерь в зависимости от характера повреждений. Так, при закорачивании листов электротехнической стали на поверхности зубцов вихревые потери возрастают в местах закорачивания; при замыкании листов внутри пакета формируются температурные аномалии именно в этих местах. Гистерезисные потери при этом остаются практически неизменными. Эти обстоятельства важны при решении целого ряда задач оптимального управления частотными и иными электроприводами.

Обычно потери в стали двигателя оценивают в форме произведения магнитного сопротивления R_μ на квадрат тока намагничивания. Эта формализация не всегда дает правильные результаты. В действительности при дефектной стали наблюдаются следующие явления:

- рост вихревых токов, который, как правило, приводит к росту тока намагничивания, что связано с уменьшением сопротивления контура намагничивания;
 - уменьшение пускового момента, а также критического момента асинхронного двигателя.
- Сказанное в значительной степени связано с изменением основных параметров машины:
- индуктивного сопротивления контура намагничивания, изменяющегося (при дефектной стали) так, что снижается электромагнитная мощность;
 - активного сопротивления цепи статора как эквивалента потерь от вихревых токов в стали, т.е. в зазоре машины;
 - индуктивного сопротивления рассеяния статора, увеличивающегося из-за вынесения магнитных потерь (потерь от вихревых токов) из контура намагничивания;
 - изменяющегося индуктивного сопротивления ротора (из-за вихревых токов в контуре ротора).

Многофакторность явления очевидна. Отсюда видно, что изменение характеристик стали влечет за собой изменение практически всех электромеханических свойств двигателя.

Так, изменение сопротивлений рассеяния основного потока приводит к снижению пускового и критического моментов, при этом приращение коэффициентов рассеивания статора и ротора могут быть различными, что, с одной стороны, затрудняет анализ, а с другой, усложняет аппарат оценивания технических характеристик.

Требуют дальнейшего анализа целый ряд вопросов, связанных с формализацией характеристик при различной степени изменения свойств стали. Известно, что рост тока холостого хода асинхронного двигателя нельзя объяснить насыщением электротехнической стали. Данное явление в основном объясняется размагничивающим действием вихревых токов, что, с одной стороны, приводит к росту потерь, а с другой стороны, к изменению основного потока.

Целью работы является формирование подхода для разделения потерь на гистерезис и от вихревых токов.

Материал исследований. В настоящее время потери в стали определяются с использованием электрических зависимостей, включающих частоту питающего напряжения f и индукцию в пакете стали B . Удельные потери при изменении частоты и индукции ($B \leq 1.6$ Тл) определяют по формуле [4]:

$$P_M = P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} B^2, \quad (1)$$

если f лежит в диапазоне 40÷60 Гц, и по формуле, в которую входят отдельно потери на гистерезис, пропорциональные частоте, и потери на вихревые токи (вместе с дополнительными потерями), пропорциональные квадрату частоты; если f изменяется в более широком диапазоне, то зависимость будет иной:

$$P_M = \varepsilon \frac{f}{50} B^2 + \sigma \left(\frac{f^2}{50} \right) B^2, \quad (2)$$

где ε - удельные потери от гистерезиса при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц, Вт/кг;

σ - удельные потери от вихревых токов при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц, Вт/кг.

Вторая составляющая в (2) определяет потери от вихревых токов. Их значение существенно возрастает при деформациях пакетов, вносимых ремонтными и предремонтными операциями, а также в процессе эксплуатации (закорачивание пакетов стали на кромках зубцов и по их глубине). Исследования показывают, что для машин средней и малой мощности, прошедших несколько ремонтов, оправдано пользоваться зависимостью (2), которую достаточно легко аппроксимировать функцией, включающей частоту и индукцию во второй степени. Здесь подчеркнем, что указанные выше зависимости носят эмпирический характер, получаемый с использованием средних значений мощности за период напряжения питания. Если в кривой индукции имеется ряд гармоник, то мощность потерь в стали на упомянутом интервале носит сложный характер, так как включает потери от гармоник. Это очевидно из следующего примера.

Пусть индукция B изменяется по гармоническому закону:

$$B(t) = B_m \cos(2\pi ft).$$

В контуре, перпендикулярном магнитным силовым линиям, индуцируется э.д.с.:

$$e(t) = c \cdot \frac{dB(t)}{dt} = -cB_m \Omega \sin(\Omega t),$$

где c - постоянный коэффициент; B_m - амплитуда меняющейся индукции; $2\pi f = \Omega$ - круговая частота тока, вызывающего индукцию $B(t)$.

Если предположить, что активное сопротивление контура R существенно больше индуктивного, то мощность в контуре, вызванная изменением потока

$$P(t) = i^2(t)R = i(t) \cdot e(t) = -c \frac{1}{R} B_m^2 \cdot \Omega^2 \sin^2(\Omega t) = -\frac{c}{2R} B_m^2 \cdot \Omega^2 + \frac{c}{2R} B_m^2 \cdot \Omega^2 \cos(2\Omega t).$$

Отсюда видно, что мощность потерь в контуре пропорциональна квадрату произведения амплитуды индукции и угловой частоте. Переменная составляющая мощности также пропорциональна квадрату упомянутых величин и изменяется по гармоническому закону с двойной частотой.

Отмеченное выше характерно тем, что в отличие от известных зависимостей для потерь в стали имеется возможность сравнительно просто получить временные зависимости потерь от параметров цепи намагничивания. Этот вывод весьма важен для создания методов для анализа устройств и систем разного предназначения путем использования энергетических критериев. Сущность этих критериев в том, что в электротехнической цепи энергопроцессы в каждом отдельно взятом элементе представляются в форме временных зависимостей мощности – мгновенной мощности [8].

На практике достаточно часто используется термин «ненасыщенная сталь» предполагающая при определении э.д.с. самоиндукции значение $L = \text{const}$. В равной степени это относится к машинам постоянного и переменного тока. Это предположение имеет далеко идущие последствия; главное из них то, что в цепи с ненасыщенной сталью принципиально не может быть потерь [5]. При этом и потери на гистерезис должны превратиться в нуль. На наш взгляд термины «насыщенная и ненасыщенная сталь» неудачно отражает физическое явление. Более рациональным является термин «степень насыщения стали», учитывающая энергетическую сторону процесса преобразования энергии в электротехническом материале. Существенное уточнение результатов исследования энергетических режимов осуществляется путем представления намагничивающего контура в форме индуктивности, зависящей от тока $L(I)$ или времени $L(t)$. Зависимость потока от тока при анализе может иметь линейный, нелинейный с насыщением, нелинейный с насыщением и гистерезисом (гистерезисный) характер (рис.1).

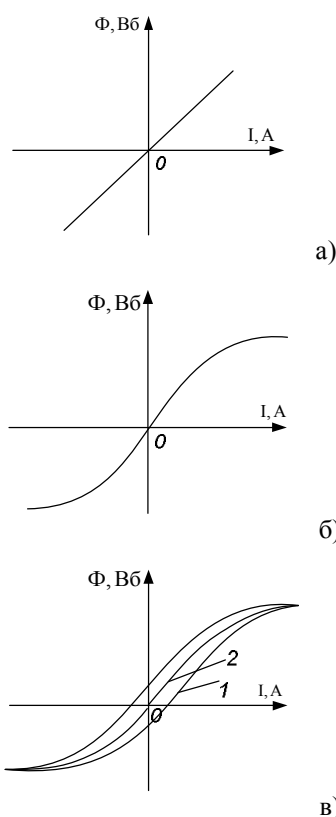


Рис.1. Зависимость потока от тока: а – линейная; б – нелинейная с насыщением; в – гистерезисная: 1 – петля гистерезиса, 2 – основная кривая намагничивания

Рассмотрим формирование мощности на индуктивном элементе с соответствующими видами характеристик.

При протекании тока $I(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (I_{an} \cos n\Omega t + I_{bn} \sin n\Omega t)$ по катушке с индуктивностью $L(t) = L_0$ зависимость мощности представим так: $P_L(t) = \frac{d}{dt} \{L(t) \cdot I(t)\} \cdot I(t)$. Применив математические преобразования, получим:

$$P_L(t) = \frac{1}{2} \Omega L_0 \sum_{n=1}^{\infty} 2n I_{an} I_{bn} \cos 2n\Omega t + (n I_{bn}^2 - n I_{an}^2) \sin 2n\Omega t. \quad (3)$$

Активную мощность получим путем интегрирования выражения (3) на интервале повторяемости. Очевидно, что из результата уйдут все гармонические составляющие, для которых интеграл на периоде равен нулю. Таким образом $\Delta P_L = \frac{1}{T} \int_0^T P_L(t) dt = 0$.

Наибольший интерес представляет два вида характеристик: нелинейная с насыщением и гистерезисная. Для установления четких математических зависимостей рассчитаем потери мощности при наличии каждого из вида нелинейности.

Зависимость тока, протекающего по цепи, упростим и примем в виде:

$$I(t) = \sum_{m_i=1}^{\infty} I_{mi} \cos(m_i \Omega t), \quad (4)$$

где m_i - номер гармоники тока; I_{mi} - максимальное значение тока.

В случае нелинейной с насыщением зависимости индуктивности математическая интерпретация для нее будет следующей:

$$L(t) = L_0 + \sum_{m_L=1}^{\infty} a_L I_{mL} \cos(2m_L \Omega t), \quad (5)$$

где m_L - номер гармоники индуктивности, I_{mL} - максимальное значение тока при такой зависимости индуктивности.

Зависимость мощности при этом

$$P_H(t) = \frac{dL(t)}{dt} I^2(t) + \frac{dI(t)}{dt} I(t)L(t). \quad (6)$$

Произведя необходимые математические преобразования, получим выражение для мощности в случае нелинейной индуктивности с насыщением:

$$P_H(t) = \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 \sin(2m_L \Omega t) - \frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\sin(2m_L + 2m_i) \Omega t + \sin(2m_L - 2m_i) \Omega t] - \frac{1}{2} I_{mi}^2 m_i L_0 \Omega \sin(2m_i \Omega t) - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\sin(2m_i + 2m_L) \Omega t + \sin(2m_i - 2m_L) \Omega t]\}. \quad (7)$$

Интегрирование мощности на периоде повторяемости даст такое значение активных потерь:

$$\Delta P_H = \frac{1}{T} \int_0^T P_H(t) dt = 0.$$

В случае гистерезисной характеристики индуктивность запишем в виде:

$$L(t) = L_0 + \sum_{m_L=1}^{\infty} a_L I_{mL} \cos(2m_L \Omega t + \Psi_{mL}), \quad (8)$$

где Ψ_{mL} - угол сдвига, определяющий отставание индуктивности от тока, обусловленный физическими процессами, протекающими в стали. Мощность в этом случае будет:

$$P_r(t) = \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\sin(2m_L \Omega t) \cdot \cos \Psi_{mL} + \cos(2m_L \Omega t) \cdot \sin \Psi_{mL}] - \frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\sin(2m_L + 2m_i) \Omega t \cdot \cos \Psi_{mL} + \cos(2m_L + 2m_i) \Omega t \cdot \sin \Psi_{mL}] - \frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\sin(2m_L - 2m_i) \Omega t \cdot \cos \Psi_{mL} + \cos(2m_L - 2m_i) \Omega t \cdot \sin \Psi_{mL}] - \frac{1}{2} I_{mi}^2 m_i L_0 \Omega \sin(2m_i \Omega t) - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\sin(2m_i + 2m_L) \Omega t \cdot \cos \Psi_{mL} + \cos(2m_i + 2m_L) \Omega t \cdot \sin \Psi_{mL}] - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\sin(2m_i - 2m_L) \Omega t \cdot \cos \Psi_{mL} + \cos(2m_i - 2m_L) \Omega t \cdot \sin \Psi_{mL}]\}. \quad (9)$$

Значение потерь мощности, отличное от нуля, на элементе с гистерезисной характеристикой получится из слагаемых, имеющих множители вида $\cos(2m_i - 2m_L) \Omega t$ или $\cos(2m_L - 2m_i) \Omega t$ для равных значений номеров гармоник ($m_i = m_L$):

$$P_r(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-\frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\cos(2m_L - 2m_i) \Omega t \cdot \sin \Psi_{mL}] - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\cos(2m_i - 2m_L) \Omega t \cdot \sin \Psi_{mL}]\} = \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-\frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 \cdot \sin \Psi_{mL} - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega \cdot \sin \Psi_{mL}\} = \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} [a_L I_{mL} \Omega I_{mi}^2 \sin \Psi_{mL} (-\frac{1}{2} m_L - \frac{1}{4} m_i)]. \quad (10)$$

$$\text{Так как } m_L = m_i = m, \text{ то } \Delta P_r = \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} -\frac{3}{4} m a_L I_{mL} \Omega I_{mi}^2 \sin \Psi_{mL}.$$

При малых углах с достаточной степенью точности можно принять следующее: $\cos \Psi_{mL} \approx 1$, $\sin \Psi_{mL} \approx \Psi_{mL}$. Тогда выражение (8) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
P_r(t) = & \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\sin(2m_L \Omega t) + \Psi_{mL} \cdot \cos(2m_L \Omega t)] - \\
& - \frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\sin(2m_L + 2m_i) \Omega t + \Psi_{mL} \cdot \cos(2m_L + 2m_i) \Omega t] - \\
& - \frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\sin(2m_L - 2m_i) \Omega t + \Psi_{mL} \cdot \cos(2m_L - 2m_i) \Omega t] - \\
& - \frac{1}{2} I_{mi}^2 m_i L_0 \Omega \sin(2m_i \Omega t) - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\sin(2m_i + 2m_L) \Omega t + \Psi_{mL} \cdot \cos(2m_i + 2m_L) \Omega t] - \\
& - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\sin(2m_i - 2m_L) \Omega t + \Psi_{mL} \cdot \cos(2m_i - 2m_L) \Omega t]\}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Постоянная составляющая получится из зависимости

$$\begin{aligned}
P_r(t) = & \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-\frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\Psi_{mL} \cdot \cos(2m_L - 2m_i) \Omega t] - \\
& - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\Psi_{mL} \cdot \cos(2m_i - 2m_L) \Omega t] \\
= & \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-\frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 \Psi_{mL} - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega \Psi_{mL}\} = \\
= & \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} [a_L I_{mL} \Omega I_{mi}^2 \Psi_{mL} (-\frac{1}{2} m_L - \frac{1}{4} m_i)].
\end{aligned} \tag{12}$$

Или с учетом равенства гармоник тока и индуктивности получим:

$$\Delta P_r = \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} -\frac{3}{4} m a_L I_{mL} \Omega I_{mi}^2 \Psi_{mL}.$$

Зависимости (7), (12) в общем виде выражают составляющие мощности на индуктивном элементе, имеющем нелинейную с насыщением и гистерезисную характеристику.

Для периодической функции, разложенной в ряд Фурье, угол сдвига Ψ_{mL} рассчитывается следующим образом [6]:

$$\Psi_{mL} = m \cdot \Omega \cdot \Delta t, \tag{13}$$

где Δt - время сдвига сигнала относительно нулевой точки.

Кроме указанных параметров, величина угла сдвига относительно нулевой точки зависит от физических свойств стали (от скорости поворота доменов), которую будем характеризовать с помощью коэффициента α . Тогда угол сдвига будет:

$$\Psi_{mL} = \alpha \cdot m \cdot \Omega \cdot \Delta t. \tag{14}$$

Обозначив $\alpha \cdot \Delta t = \delta$, получим окончательное выражение:

$$\Psi_{mL} = \delta \cdot m \cdot \Omega \tag{15}$$

Учитывая выражение (15), мощность для элемента с гистерезисной характеристикой примет вид:

$$\begin{aligned}
P_r(t) = & \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-\frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 [\delta \cdot m \cdot \Omega \cdot \cos(2m_L - 2m_i) \Omega t] - \\
& - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega [\delta \cdot m \cdot \Omega \cdot \cos(2m_i - 2m_L) \Omega t] = \\
= & \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} \{-\frac{1}{2} a_L I_{mL} m_L \Omega I_{mi}^2 \delta \cdot m \cdot \Omega - \frac{1}{4} I_{mi}^2 m_i a_L I_{mL} \Omega \delta \cdot m \cdot \Omega\} = \\
= & \sum_{m_L=1}^{\infty} \sum_{m_i=1}^{\infty} [a_L I_{mL} \Omega I_{mi}^2 \delta \cdot m (-\frac{1}{2} m_L - \frac{1}{4} m_i)].
\end{aligned} \tag{16}$$

Анализ постоянной составляющей показывает, что величина потерь пропорциональна углу сдвига между током и индуктивностью Ψ_{mL} . Потери на элементе с гистерезисной характеристикой пропорциональны току в третьей степени и частоте в квадрате.

С учетом полученных результатов выполним анализ схемы замещения асинхронного двигателя, представленной на рис.2. Ее особенностью является контур намагничивания, который состоит из двух ветвей, одна из

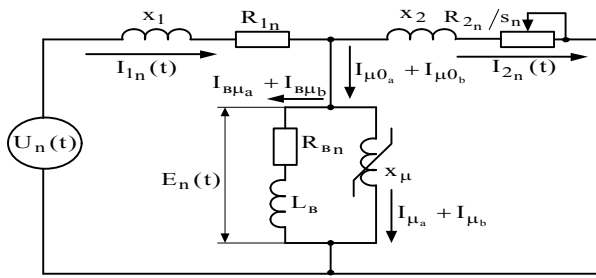


Рис.2. Схема замещения асинхронного двигателя с учетом насыщения стали и вихревых токов

$$P_{\hat{a}}(t) = E(t) \cdot I_{\mu 0}(t) = E_{L\hat{a}}(t) \cdot I_{\hat{a}\mu}(t) + E_{R\hat{a}}(t) \cdot I_{\hat{a}\mu}(t) + E_L(t) \cdot I_{\mu},$$

$$P_B(t) = P_{LB}(t) + P_{RB}(t),$$

(17)

где P_{LB} и P_{RB} - мгновенные мощности контура намагничивания. Зависимости для P_{LB} и P_{RB} известны из исследований авторов [7].

Мощность активных потерь от вихревых токов определяется зависимостью

$$P_{\hat{a}} = \frac{1}{T} \int_0^T E_L(t) \cdot I_{\hat{a}\mu}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^{n=N} [E_{Ln} \cos(n\Omega t) + E_{Ln} \sin(n\Omega t)] \cdot [I_{\hat{a}na}(t) \cos(n\Omega t) + I_{\hat{a}nb}(t) \sin(n\Omega t)] dt. \quad (18)$$

В свою очередь можно записать

$$I_{B\mu n} = \frac{E_{Ln}}{\sqrt{n^2 L_B^2 + R_{Bn}^2}}.$$

Отсюда видно, что мощность потерь пропорциональна квадрату составляющих э.д.с. индуктивности. Каждая составляющая, в свою очередь, пропорциональна порядковому номеру соответствующей гармоники [8]. С учетом отмеченного можно сделать вывод, что составляющие потерь от вихревых токов пропорциональны квадрату э.д.с. соответствующей гармоники, ее порядку, сопротивлению R_{Bn} , зависящему, в свою очередь, от частоты $R_{Bn} = R_B \cdot n^\alpha$. Отмеченное объясняет, что потери от вихревых токов весьма значительно возрастают по мере увеличения насыщения стали [9].

Гистерезисные потери незначительно возрастают по мере роста индукции. Они определяются в соответствии с приведенными ранее зависимостями, учитывающими угол сдвига между намагничивающим током и индуктивностью. Зависимость для определения составляющих потерь при этом приобретает вид:

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T E_L(t) \cdot I_{\mu}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T E_L(t) \cdot I_{\hat{a}\mu}(t) dt,$$

где $I_{\mu}(t) = I_{\mu 0}(t) - I_{\hat{a}\mu}(t)$.

Выводы. В работе обоснована необходимость и возможность разделения потерь мощности в стали на составляющие. Результаты исследований позволяют получить зависимости общих и составляющих потерь в стали от степени ее насыщения.

Материалы исследований объясняют природу резкого увеличения потерь с ростом насыщения пакета. Упомнутый рост потерь в основном связан с существенным ростом потерь от вихревых токов.

То обстоятельство, что гистерезисные потери и потери от вихревых токов концентрируются в разных местах пакета, их перераспределение требует коррекции подходов к оценке допустимой нагрузки электрической машины при изменении параметров электропитания в широких пределах.

Литература.

1. Энергетический менеджмент / А.В. Праховник, А.И. Соловей, В.В. Прокопенко и др. – К.: ИЕЕ НТУУ „КПИ”, 2001. – 472с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928с., ил.
3. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. М., Энергия, 1975, С.320.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. - М.: Высш. шк.,1984. – 559с.
5. Родькин Д.И. Мгновенная мощность индуктивности с насыщением // Электромашинобудовання та електрообладнання. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». Вип. 66., 2006. – Оdesa. - С. 282-285.
6. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное. - М.: Энергия, 1975.- 752с.
7. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14 научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2007.- С. 273-278.
8. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, Вип. 1/2003. – Кременчук. - С.80-85.
9. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. - М.:Энергоиздат, 1981. - 184с.

которых учитывает насыщение стали, а другая – вихревые токи.

Контур вихревых токов образуется активным сопротивлением R_{Bn} и индуктивностью L_B , включенных параллельно контуру намагничивания. Несмотря на значительность вихревых токов, они все же существенно ниже тока намагничивания. С учетом этого положения можно записать, что $E_L(t) = E_B(t) = E(t)$, причем $E_L(t)$ не зависит от $I_{B\mu}$.

Следовательно, мгновенная мощность контура намагничивания