

УДК 621.313.333.02

## ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В СТАЛИ С НАСЫЩЕНИЕМ

**В. В. Ченчевой, Д. И. Родькин, В. А. Огарь**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: [sau@kdu.edu.ua](mailto:sau@kdu.edu.ua)

Получено аналитическое выражение для определения потерь в стали асинхронной машины, удобное для практического применения и требующее значительно меньших вычислительных затрат по сравнению с уже существующими методиками. Предложенный метод позволяет получить относительно простые зависимости с большой степенью точности для формирования задающих воздействий и использовать их в системах минимизации потерь регулируемого электропривода. Найденные зависимости пригодны для описания потерь в стали, что необходимо при проектировании системы автономной генерации энергии и определения максимальной нагрузочной способности генераторной установки.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, насыщение, потери в стали.

## ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ У СТАЛІ З НАСИЩЕННЯМ

**В. В. Ченчевой, Д. Й. Родькін, В. О. Огарь**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: [sau@kdu.edu.ua](mailto:sau@kdu.edu.ua)

Отримано аналітичний вираз для визначення втрат у сталі асинхронної машини, зручне для практичного застосування, що вимагає значно менших обчислювальних витрат порівняно з уже існуючими методиками. Запропонований метод дозволяє отримати відносно прості залежності з великим ступенем точності для формування задаючих впливів і використовувати їх у системах мінімізації втрат регульованого електроприводу. Знайдені залежності придатні для опису втрат у сталі, що необхідно при проектуванні системи автономної генерації енергії та визначення максимальної навантажувальної здатності генераторної установки.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, насичення, втрати у сталі.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Многие электротехнические устройства (силовые трансформаторы, электрические машины, трансформаторы тока, дроссели и т.д.) содержат шихтованные магнитопроводы, которые набираются из пластин электротехнической стали. При работе этих устройств значительная часть энергии рассеивается в их магнитных системах. Уменьшения потерь можно добиться за счет улучшения характеристик используемой стали, но это приводит к удорожанию изделия из-за более высокой цены материала. Другой возможный путь – это совершенствование конструкций магнитопроводов электротехнических устройств в результате оптимизационных расчетов с помощью математических моделей, с высокой точностью описывающих электромагнитные процессы.

При моделировании асинхронного двигателя (АД) для упрощения математических зависимостей часто пренебрегают описанием физических процессов, протекающих в машине. К ним следует отнести и потери в стали. Однако в некоторых режимах неучет этого явления приводит к существенным отклонениям расчетных характеристик асинхронной машины от реальных. В литературе [1] потери в стали, как правило, представляют постоянной составляющей или линейно зависящей от таких параметров, как напряжение, потокосцепление и т.д. Тем не менее, в реальной машине на потери в стали оказывает влияние воздушный зазор, поток статора и частота. Следовательно, для того, чтобы получить

более точные как статические, так и динамические характеристики асинхронной машины, необходимо учитывать указанные факторы. Это особенно важно при исследовании работы асинхронного генератора на различную нагрузку, что позволяет оценить максимальную перегрузочную способность генераторной установки.

О недостаточной изученности вопроса оценки потерь в стали говорит тот факт, что в последние 10–15 лет появилось большое число публикаций, затрагивающих проблему в той или иной постановке: достаточно часто используются так называемые полевые методы, базирующиеся на изучении взаимодействия магнитомягких материалов в полях разной конфигурации, разных уровнях напряженности [1]; разнообразны исследования направлены на математическое описание процессов намагничивания и перемагничивания материалов [2, 3]; экспериментальные методы оценки потерь мощности в сердечниках электрических машин и аппаратов [4].

Достаточно перспективными являются исследования, отнесенные нами условно ко второй группе в связи с тем, что они позволяют наиболее наглядно анализировать физическую сторону процессов. В работе [2] отмечается, что магнитный гистерезис обусловлен наличием временной задержки образования и роста зародышей перемагничивания, “и для полного математического описания петли гистерезиса ферромагнитного материала в частотной области, ограниченной полосой пропускания магнитопровода, необходимо и достаточно учитывать временное и фазовое запаздывание намагниченности по отношению к напряженности магнитного поля”. Этот факт, несмотря на комментарии разных авторов, до настоящего времени не оценен применительно к конструктивным материалам, в первую очередь, электрических машин, хотя естественно, что запаздывание процессов перемагничивания по отношению к магнитодвижущей силе является причиной возникновения петли гистерезиса, а, следовательно, и магнитных потерь. Математическое описание магнитного гистерезиса, выполненное Кандауровой Г.С. в работе [3], касается разных сторон процессов намагничивания перемагничивания и имеет важную теоретическую и прикладную сторону.

В работе Тимофеева И.А. [5] теоретически доказано, что на процессы в ферромагнитных материалах влияет совместное взаимодействие доменной и дислокационной структур, что является важным вопросом в создании новых эффективных магнитных материалов. В [6] показана целесообразность анализа процессов в ферромагнитном материале в форме двух составляющих – статической кривой намагничивания и экспериментальной “эллипсоидальной кривой”, которые в совокупности образуют динамическую кривую намагничивания. Этот метод исследования ферромагнитных материалов позволяет получить петлю гистерезиса с высокой точностью.

Следует отметить, что вышеперечисленные исследования, как и многие другие, касаются изучения непосредственно материалов, что не вполне отвечает тем результатам, которые могли быть получены на тех или иных конструкциях, в которые составной частью входят и ферромагнитные материалы. Примером таких конструкций являются электрические машины. Характерным примером экспериментального определения потерь в стали, и, прежде всего, при глубоком насыщении, являются исследования, выполненные проф. Петровым Л.П. [7].

В работе [7] указано, что рост насыщения приводит к резкому возрастанию потерь, которые становятся соизмеримыми с мощностью двигателя. Учет потерь в стали как величины, пропорциональной квадрату магнитной индукции, создает значительную погрешность, поскольку такая взаимосвязь справедлива только для ненасыщенного магнитопровода. Например, для двигателя А02–31–4 мощностью 2,2 кВт потери в стали при номинальном потоке составляют 40 Вт. Если не учитывать насыщение, то при увеличении

потока в 1,5 раза потери должны возрасти в 2,25 раза и составить 90 Вт. В действительности при таком потоке они составляют 850 Вт (рис. 1).

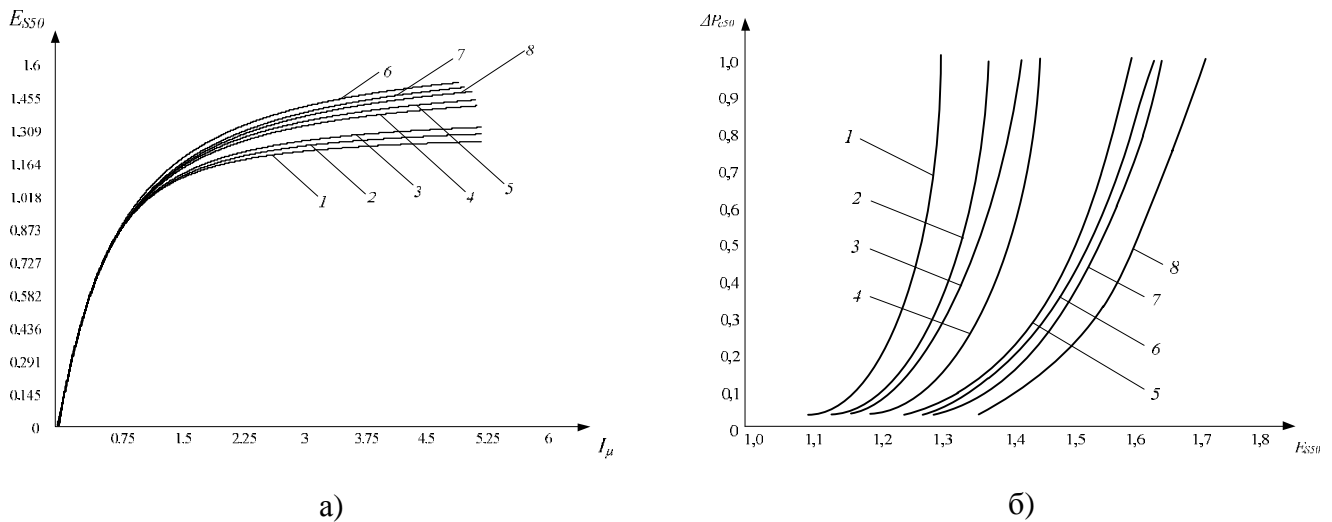


Рисунок 1 – Экспериментальные кривые намагничивания (а) и потерь в стали (б) асинхронных двигателей:

1 – АОЛ2-11-4 (АОЛ2-31-6), 2 – АОЛ2-41-6, 3 – АОЛ2-21-4 (АОЛ2-32-6), 4 – АОЛ2-21-2, 5 – АОЛ2-42-4, 6 – АОЛ2-32-2 (АОЛ2-31-4), 7 – АОЛ2-41-4 (АОЛ2-31-2), 8 – АОЛ2-32-4

Следовательно, расчет потерь без учета насыщения дает значение почти в 10 раз меньше фактического. Аналогичные результаты получаются для других двигателей серий А2 и 4А. Поэтому для получения приемлемой точности расчетов тормозных моментов необходимо учитывать действительные потери – в стали статора. Зависимость этих потерь от степени насыщения не имеет общего аналитического выражения и определяется конструкцией и материалом корпуса каждого конкретного двигателя. Поэтому определить потери можно только экспериментальным путем одновременно со снятием кривой намагничивания, без которой точный анализ режима конденсаторного торможения невозможен.

Значительное возрастание магнитного потока машины в режиме конденсаторного торможения вызывает увеличение степени насыщения ее магнитной цепи. Поэтому пренебрежение потерями в стали приводит к заметным ошибкам в определении тормозных моментов и часто является недопустимым.

Выводы, сделанные в [15–16], многократно подтверждались экспериментальными исследованиями, дополнительно говорящими в пользу поиска доступных методов потерь в стали и, по возможности, их разделения на составляющие. Иллюстрацией являются результаты экспериментальных исследований [17], приведенные на рис. 2.

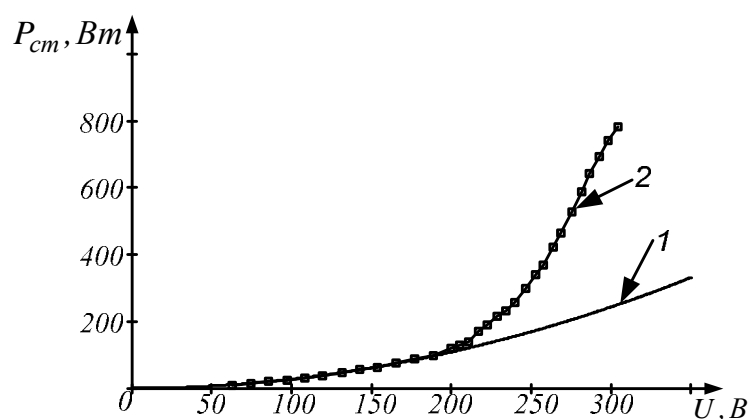


Рисунок 2 – Квадратичная зависимость потерь в стали от напряжения (1) и экспериментальная кривая потерь в стали (2)

Значительная разница в результатах эксперимента и расчета по общепринятой методике говорит, прежде всего, о насущности поднимаемого вопроса. Дополнительным аргументом в пользу детализации оценок потерь в стали со всеми вытекающими отсюда выводами является поток публикаций по данному вопросу, что, по-видимому, в какой-то мере дополнительно объясняет расширение возможностей исследователя в части подходов при моделировании и анализе [16–18]. Здесь следует внести определенную ясность в сущность вопроса.

Известно, что при напряжениях, превышающих номинальное, происходит резкое возрастание потерь в стали [17]. На сегодняшний день существует экспериментальный метод определения потерь в стали, базирующийся на опыте холостого хода и предполагающий зависимость потерь в стали в функции квадрата приложенного напряжения [8]:

$$\Delta P_{ст} = aU^2 .$$

Однако такая взаимосвязь применима лишь в случае ненасыщенного магнитопровода, в остальных случаях она дает ошибочные результаты, связанные с учетом явления насыщения.

Рост степени насыщения зависит от многих причин:

- из-за старения пакетированной электротехнической стали;
- из-за превышения напряжения питания в результате несоблюдения норм на качество электрической энергии;
- из-за несоблюдения или некачественной установки закона частотного управления в системах частотно-регулируемого электропривода.

В связи с указанными факторами оценка потерь в стали в функции квадрата приложенного напряжения приведет к значительным погрешностям, что повлечет за собой частый выход из строя электрических машин.

Кроме указанного подхода, потери в стали рассматривают, привязываясь к индукции около 1,1–1,4 Тл, и пользуются зависимостью, известной из литературы [9]:

$$\Delta P_{н\dot{o}} = \tilde{\eta} f^a B^b ,$$

где  $a$  и  $b$  достаточно близки к 1,6–2.

Вопросами намагничивания ферромагнитных материалов занимались многие авторы. Достаточно отметить работы [10–14]. Недостатки уравнений кривых намагничивания в работах следующие: одни недостаточно точны в широком диапазоне изменения напряженности магнитного поля  $H_j$ , другие при ручном счете громоздки и эффективны

только в случае применения ЭВМ, третьи пригодны только для графоаналитического решения. Все они строятся без учета физических процессов намагничивания и аппроксимируют экспериментальные кривые.

В технической литературе, в особенности посвященной исследованию режимов работы асинхронных и других видов электрических машин, установились термины: ненасыщенная сталь при работе на линейной части кривой намагничивания; отсутствие потерь в стали из-за низкой степени насыщения электротехнической стали и др. При этом за основу анализа берется “статическая” кривая намагничивания, не связанная с петлей гистерезиса и соответствующими потерями в стали. Внесем некоторую ясность в толкование указанных вопросов.

Формально потерь в стали нет, если она намагничена постоянным током (по обмотке протекает не изменяющийся во времени ток намагничивания). При этом не учитывается то обстоятельство, что для намагничивания до заданного уровня затрачена энергия, связанная соответствующим образом с запасенной электромагнитной энергией  $W_g = \frac{LI^2}{2}$ .

При постоянном токе мощность потерь в стали формально проявляется при подключении источника питания, а также при его отключении и связана со скоростью изменения запасенной энергии  $W_g$ . При изменении тока нагрузки соответствующим образом формируется мощность и энергия потерь в стали; при периодическом изменении тока нагрузки уровень мощности потерь в стали приобретает постоянные значения, если частота и амплитуда протекающего по обмотке тока неизменны.

О петле гистерезиса можно говорить, во-первых, при периодически изменяющихся во времени сигналах, а во-вторых, в случае, если имеет место фазовый сдвиг между потоком и намагничивающим током. Последнее условие означает, что процессы, протекающие в материале, не идеализированы и должны отражать природу явлений.

При условиях, учитывающих, что при синусоидальном напряжении индукция  $B(t)$  содержит кроме основной гармоники еще и высшие гармонические и частоты  $f_i$  парциальных составляющих, имеющие свои конкретные значения, очевидна сомнительность выражения  $\Delta P_{cm}(f, B)$  как по указанной причине, так и в связи с тем, что каждая из составляющих имеет свою индивидуальную микропетлю гистерезиса. Анализ источников показывает, что фундаментальные процессы в ферромагнетике трудно представить простыми аналитическими зависимостями, пригодными для практического использования [19].

Подавляющая часть исследований базируется на предположении наличия информации об индукции в ферромагнетике и известных зависимостях потерь в стали от частоты и индукции в соответствующих степенях, о чем говорилось выше. Это общепринятый подход, ряд исследований, по существу, модифицируют его [20]. При этом гистерезисные и общие потери представляют в виде зависимостей:

$$\Delta P_{\bar{a}} = K_{\bar{a}}(f, B) f B^2; \quad (1)$$

$$\Delta P_{\hat{a}} = K_{\hat{a}}(f, B) f^2 B^2, \quad (2)$$

где  $K_{\bar{a}}(f, B)$ ,  $K_{\hat{a}}(f, B)$  – коэффициенты гистерезисных потерь и потерь от вихревых токов соответственно, значения которых варьируются в зависимости от частоты и индукции магнитного потока.

Коэффициенты  $K_{\bar{a}}$  и  $K_{\hat{a}}$  представляются полиномиальными зависимостями от индукции  $B$ :

$$K_{\hat{a}}(B) = K_{\hat{a}3}B^3 + K_{\hat{a}2}B^2 + K_{\hat{a}1}B + K_{\hat{a}0}; \quad (3)$$

$$K_{\hat{a}}(B) = K_{\hat{a}3}B^3 + K_{\hat{a}2}B^2 + K_{\hat{a}1}B + K_{\hat{a}0}. \quad (4)$$

В выражениях (1–4) значения коэффициентов  $K_c$ ,  $K_g$ , а также индукции нуждаются в экспериментальном определении, что, естественно, является сложной, затруднительной процедурой. Примечательно, что авторы работы напрямую показывают сложность зависимости  $K_c$  и  $K_g$  от индукции.

При перемагничивании стали несинусоидальным током составляющие мощности потерь определяются как

$$\Delta P_{c\Sigma} = \sum_{n=1}^{n=N} \Delta P_{cn} + \sum_{n=1}^{n=N} \Delta P_{gn}, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{\hat{c}n} = K_{\hat{c}n}(B_n) f^2 n^2 B_n^2$ ;  $\Delta P_{\hat{g}n} = K_{\hat{g}n}(B_n) f n B_n^2$ ,  $n$  – порядок гармоник индукции.

Очевидна сложность такого подхода оценки потерь, что указывает на неприемлемость метода в инженерной практике.

Анализ источников показывает стремление исследователей найти свои подходы к решению задачи, что говорит однозначно как о незаконченности поисков, так и стремлении повысить точность результатов анализа. В работе [21] сделана попытка учесть наличие гармоник индукции, при этом потери определяются суммой:

$$\Delta P_c = K_{ec} \sum_{n=1}^{n=\infty} B_n^2 (fn)^2, \quad (6)$$

где  $K_{ec}$  – коэффициент, определяемый на основании классических (в том числе геометрических) параметров материала ферромагнетика с дополнением поправочного коэффициента, определяемого достаточно сложным путем с использованием гиперболических функций. В исследовательской работе [22] потери в стали определяются с учетом того, что их уровень зависит не только от приращения и величины индукции, но и от скорости ее изменения в степени 2 и 1,5. Этот анализ указывает на отсутствие однозначных методов оценки потерь в стали, которые можно было бы использовать в исследованиях, базирующихся на общепринятых подходах при анализе энергопроцессов в электромеханических системах.

Один из таких подходов – использование схем замещения, в частности, для анализа асинхронных машин. На рис. 3 приведены пять так называемых Т–образных схем замещения.

Схемы “b” и “c”, в отличие от схемы “a”, включают цепи, “отвечающие” за потери в стали. Первая из этих схем характерна тем, что потери зависят от квадрата тока намагничивания при известном напряжении контура  $U_\mu$ :

$$\Delta P_c = \frac{U_{m(n)}^2 R_{m(n)}}{\left(\sqrt{x_m^2 n^2 + R_{m(n)}^2}\right)} = \frac{U_{m(n)}^2 R_{m0} n^2}{x_m^2}. \quad (8)$$

Выражение для схемы “b” получено в предположении  $R_m = R_{m0} n^a$  и  $R_{m0} \ll x_m$ , с учетом того, что  $n$  – относительная частота перемагничивания.

При параллельном включении сопротивления  $R_m$  и с учетом того, что ток в эквивалентном контуре потерь существенно меньше тока намагничивания ( $R_{m0} \ll x_m$ ), потери в стали будут



$$\Delta p_c = \frac{U_{m(n)}^2}{R_{m(n)}^2} = \frac{U_{m(n)}^2}{R_{m0} n^a}. \quad (9)$$

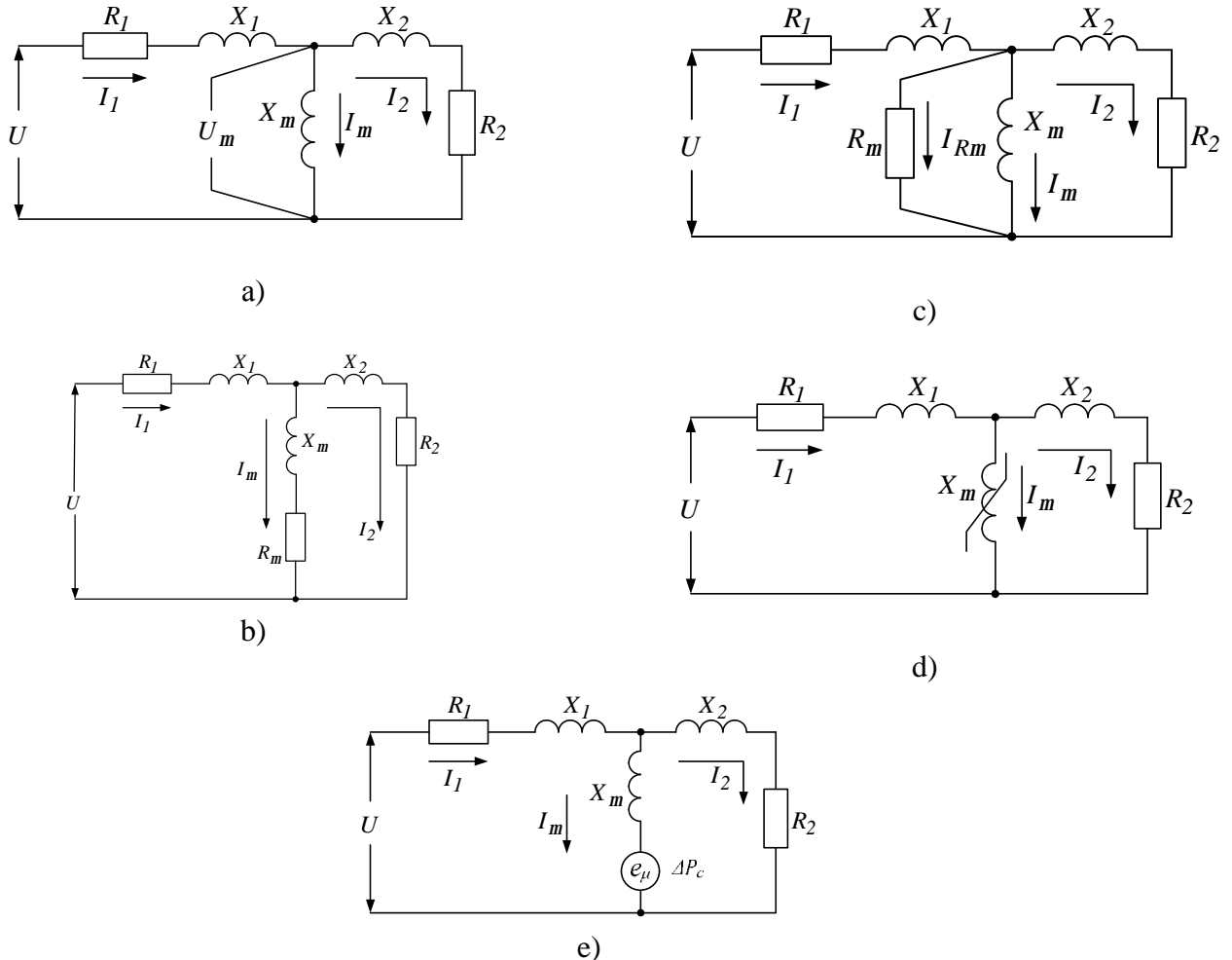


Рисунок 3 – Схемы замещения фазы асинхронного двигателя:

*a* – с насыщаемой индуктивностью  $L_\mu$ ; *b* – с сопротивлением  $R_\mu$  контура намагничивания; *c* – с параллельным контуром ; *d* – с насыщаемой индуктивностью  $x_\mu$  b без потерь в стали; *e* – схема с э.д.с. на переменной части индуктивности  $L_\mu(I)$

Сравнение полученных выражений из схем замещения показывает, что потери, получаемые расчетным путем, по-разному зависят от параметров  $a$  и  $n$ , что говорит о практической невозможности их использования при свободном выборе той или иной схемы замещения. Проще – схемы не отражают сути энергопроцессов в соответствующих контурах. Схема рис. 3,*d* представляет модернизированную схему рис. 3,*a*, но с насыщаемой индуктивностью, что, однако, не означает схему замещения асинхронного двигателя с потерями в стали, т.к. для этого необходимо соблюдение определенных условий. В частности, если говорить о насыщаемой идеальной индуктивности без специфических эффектов, характерных для ферромагнетиков, то, как и в схеме рис. 3,*a*, схема не предполагает наличия потерь в стали.

На рис. 4 представлены диаграммы электромагнитных процессов в индуктивности.

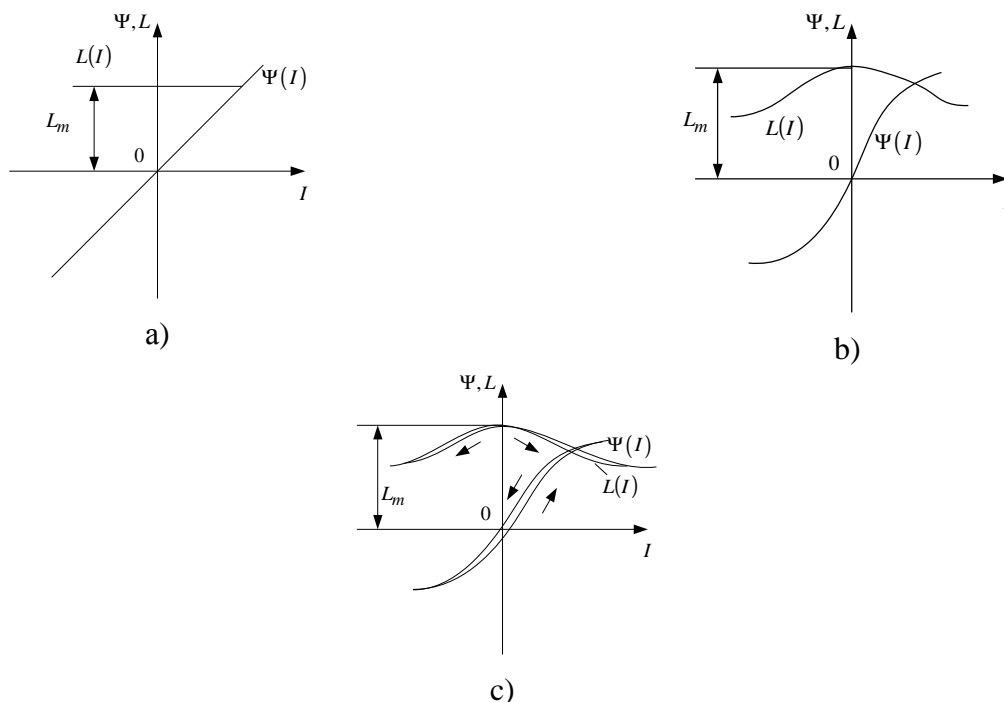


Рисунок 4 – Диаграмма изменения электромагнитных параметров цепи намагничивания: *a* – индуктивности без насыщения; *b* – в индуктивности с насыщением и без потерь в стали; *c* – в индуктивности с насыщением и с потерями

Формально можно утверждать, что в природе не существует идеальных индуктивностей с ферромагнитным сердечником с насыщением и без потерь; они могут быть незначительными, пренебрежимо малыми. Явление насыщения протекает во временной области, и это объясняет наличие петли гистерезиса. Запаздывание этих процессов – основа потерь мощности при явлении перемагничивания. Эта картина представлена на рис. 4,с. Наличие запаздывания и потери приводят к деформации зависимостей  $L(I)$ ;  $\Psi(I)$ .

Исследования, связанные с потерями в стали, можно условно разделить на экспериментальные, с использованием эмпирических зависимостей, методы эквивалентных схем замещения, метод нейронных сетей.

Общим недостатком всех вышеперечисленных методов определения потерь в стали является содержание большого количества неизвестных элементов, что делает их громоздкими и сложными при использовании в практических целях (создании систем минимизации потерь, определении нагрузочной способности генерирующих систем).

В связи с этим целью работы является формирование подхода по представлению потерь в стали, основанном на математической зависимости с минимальным количеством аппроксимирующих коэффициентов с учетом реальных физических явлений, протекающих в асинхронном двигателе.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** От математического выражения определения потерь в стали асинхронной машины двигателя требуется выполнение следующих условий:

- достаточная универсальность для различных типов двигателей;
- удобство и простота при практическом использовании.

Для ее нахождения рассмотрим физические процессы при намагничивании ферромагнетика. В цепях переменного тока магнитопроводы периодически перемагничиваются. При размагничивании магнитная индукция сердечника уменьшается не до нуля: имеет место остаточный магнетизм. Магнитный гистерезис вызывает нагрев стали и



потери электроэнергии на перемагничивание. Площадь петли гистерезиса пропорциональна затраченной энергии. Для разных ферромагнитных материалов площади петли гистерезиса различны и характеризуют свойства материалов. При нулевом поле суммарному объему доменов, намагниченных в одном направлении, соответствует равный ему объем доменов, намагниченных в противоположном направлении, и поэтому результирующая намагниченность равна нулю. Это равновесие, однако, нарушается при наложении внешнего поля. По мере роста поля все большую часть объема образца будут занимать домены с намагниченностью, параллельной полю, увеличивая тем самым суммарную намагниченность. Наконец, антипараллельных полю доменов не остается: магнитные моменты всех атомов располагаются в направлении поля. Данное состояние называется насыщением, а намагниченность – намагниченностью насыщения.

При уменьшении величины поля от наибольшего значения ход изменения намагниченности уже будет иметь другой характер. Когда поле уменьшится до нуля, намагниченность все еще будет иметь конечную положительную величину, которая называется остаточной намагниченностью. Для достижения нулевой намагниченности требуется приложить обратное размагничивающее поле, называемое коэрцитивной силой. Когда поле достигает больших отрицательных значений, а затем опять возрастает до больших положительных значений, изменение намагниченности описывается кривой, называемой петлей гистерезиса [24].

Характерной особенностью этой кривой является то, что она наглядно показывает отставание процесса размагничивания от уменьшающегося намагничивающего поля. Это отставание показывает, что энергия, приобретенная ферромагнетиком при намагничивании, не полностью отдается при размагничивании – часть энергии теряется. Величина магнитной энергии, потерянной в течение полного цикла, пропорциональна площади, охватываемой петлей гистерезиса.

Таким образом, потенциальная энергия, израсходованная в единице объема ферромагнитного сердечника за один цикл перемагничивания, определяется площадью, ограниченной петлей магнитного гистерезиса. Графически энергия (работа) представляет собой площадь элементарной полоски динамической кривой намагничивания.

Полная работа по перемагничиванию единицы объема вещества определится в виде интеграла по контуру динамической кривой намагничивания [24]:

$$A = \oint idE. \quad (7)$$

Используя приложения к формуле Грина для расчета криволинейных интегралов по замкнутому контуру [25], определяем, что площадь динамической кривой намагничивания равна:

$$S = \frac{1}{2} \oint (idE - Edi). \quad (8)$$

Таким образом, петля гистерезиса является важной характеристикой магнитных материалов, поскольку она позволяет рассчитывать потери энергии в устройствах, где эти материалы используются.

Проанализируем процессы, происходящие при перемагничивании ферромагнетика (рис. 5).

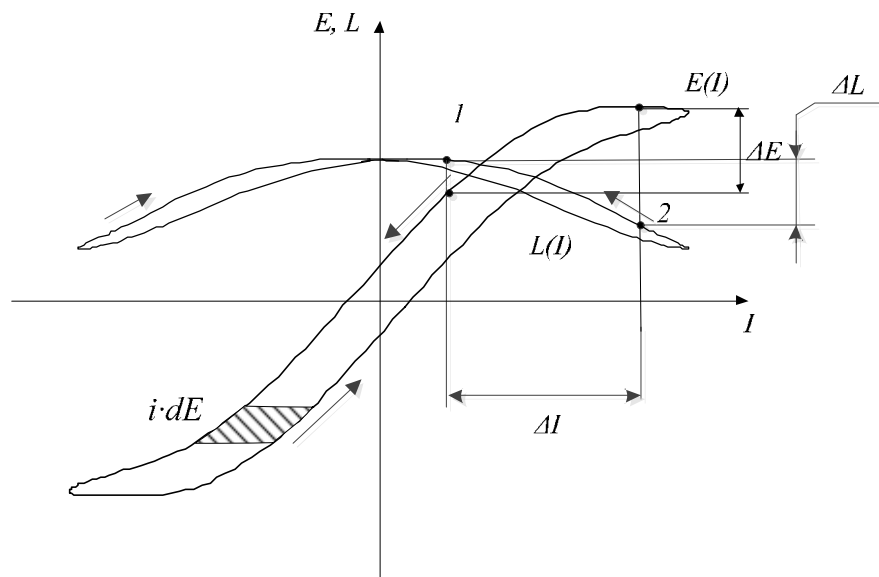


Рисунок 5 – Динамическая кривая намагничивания  $L(I)$  и петля гистерезиса  $E(I)$

При приращении функции  $\Delta E (\Delta L)$  от  $\Delta I$  происходит движение из точки 1 с магнитной энергией  $W_1 = \frac{1}{2} L_1 (i_1)^2$  в точку 2 с запасенной магнитной энергией  $W_2 = \frac{1}{2} L_2 (i_2)^2$ , в результате чего происходит выделение энергии:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{1}{2} L_2 (i_2)^2 - \frac{1}{2} L_1 (i_1)^2. \quad (10)$$

Данная энергия пропорциональна потерям в стали, т.е. перемещение из одной точки кривой намагничивания в другую сопровождается потерями энергии, пропорциональными изменениям индуктивности и тока:

$$\Delta W \sim f(\Delta L, \Delta I). \quad (11)$$

Анализируя рис. 6, видно, что кривая изменения  $\frac{dE}{dI}$  имеет аналогичный характер с изменением кривой индуктивности намагничивания, вследствие чего можно предположить, что

$$L(I) = z \frac{dE(I)}{dI}, \quad (12)$$

где  $z$  – коэффициент пропорциональности.

На рис. 5 представлена зависимость потерь в стали от производной ЭДС по току намагничивания. Обратная ей величина, согласно выражению (14), с учетом коэффициента пропорциональности, и служит искомой функцией для описания кривой потерь.

Или, исходя из выражения (11) и рис. 7, можно предполагать, что

$$\Delta P_{\dot{n}o} (I) \sim f \left( 1 / \left( \frac{dE(I)}{dI} \right) \right). \quad (13)$$

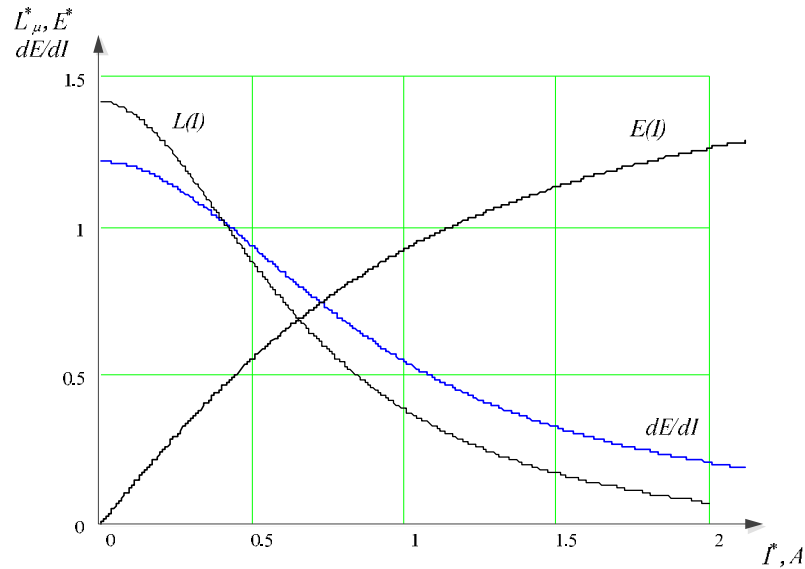


Рисунок 6 – Кривая намагнічвання асинхронного двигателя (универсальная) (а) и зависимость производной ЭДС от тока намагнічвання (б)

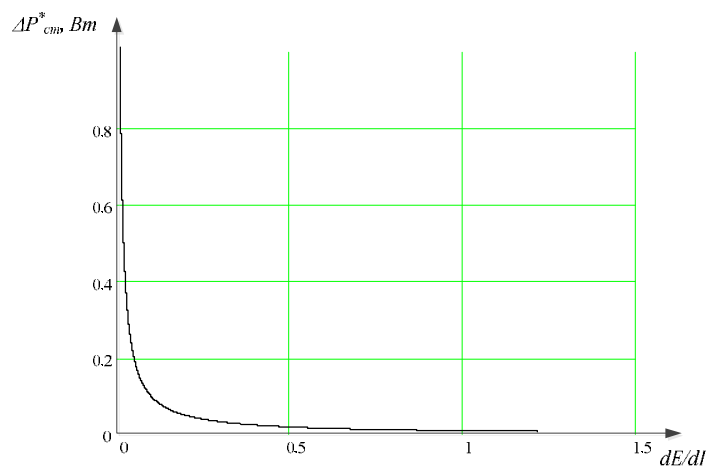


Рисунок 7 – Зависимость потерь в стали от производной ЭДС по току намагнічвання

Учитывая значительный рост потерь при увеличении степени насыщения, была выдвинута гипотеза, что изменения потери в стали обратно пропорциональны изменению  $\frac{dE}{dI}$ . На основе анализа экспериментальных кривых потерь предложено эмпирическое выражение для определения потерь в стали:

$$\Delta P_c(I) = x / \left( \frac{dE(I)}{dI} \right). \quad (14)$$

Для подтверждения данного предположения в качестве исследуемого объекта был выбран асинхронный двигатель АО2–31–2. На рис. 8,а представлена экспериментальная кривая намагнічвання (2) для двигателя АО2–31–2, полученная проф. Петровым (рис. 1), и аппроксимирующая кривая (1)  $E(I) = \frac{1}{a} \left( cth(bI) - \frac{1}{cI} \right)$ . Выбор именно такого вида

аппроксимирующей функции (функция Ланжевена) связан с тем, что она является выражением, полученным на основании анализа физических процессов намагничивания ферромагнитного вещества как совместного проявления двух процессов: спонтанного намагничивания под влиянием взаимодействия магнитных моментов атомов внутри доменов и ориентации суммарных моментов доменов относительно внешнего магнитного поля [25].

На рис. 8,б показано сравнение экспериментальной характеристики и характеристики, полученной с помощью аналитического выражения  $\Delta P_c = x \frac{dE}{dI}$ .

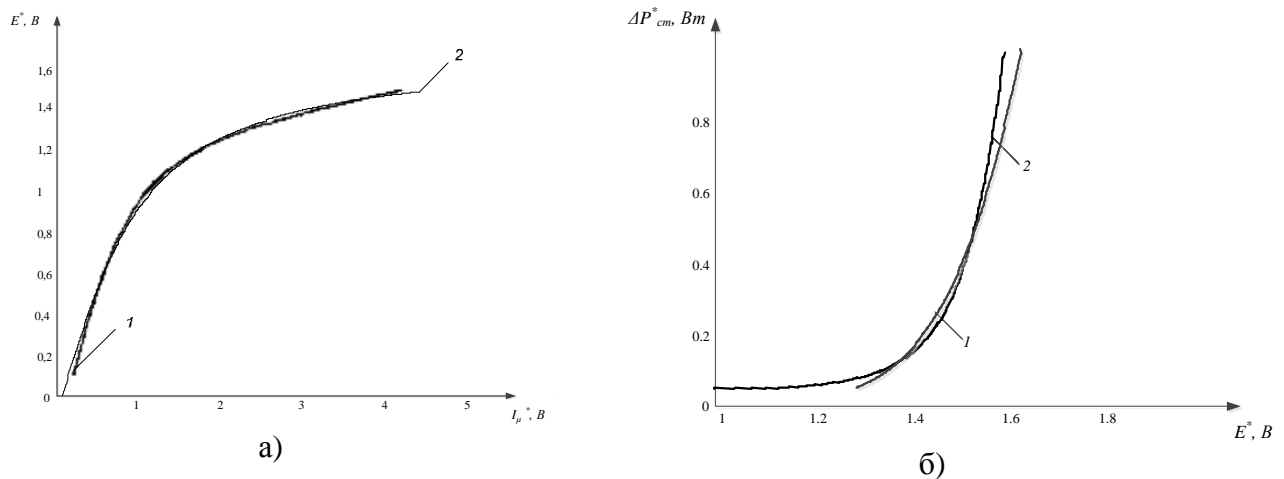


Рисунок 8 – Сравнение кривых намагничивания (а) и кривых потерь стали (б) асинхронного двигателя:

1 – экспериментальные кривые, 2 – расчетные

С помощью программы компьютерной математики было рассчитано, что для коэффициента пропорциональности  $x = 0,01$  дисперсия адекватности  $s^2 = 0,023$ , коэффициент корреляции  $R = 0,999$ .

Как видно, предложенный простой способ определения потерь в стали позволяет с высокой точностью описать экспериментальные данные для различных типов двигателей. Совпадение экспериментальной кривой с кривой, полученной на основании предложенного математического выражения, позволяет считать, что данный способ является универсальным и его можно использовать для описания кривых потерь.

**ВЫВОДЫ.** Применение существующих методов связано со значительными трудностями, среди которых проблема определения параметров модели, сложные зависимости параметров от переменных асинхронной машины (токов, потокосцеплений, частоты токов статора и ротора), существенное усложнение системы уравнений и алгоритмов расчета. Известные методы расчета либо учитывают только часть этих эффектов, например, насыщение цепи намагничивания, либо настолько сложны, что плохо подходят для применения в задачах анализа процессов в асинхронной машине. Несмотря на множество работ в этой области, не существует единого подхода описания потерь, позволяющего однозначно использовать его в практических целях.

В ходе исследований был сформирован подход к определению потерь в стали, основанный на зависимости с минимальным количеством аппроксимирующих коэффициентов с учетом реальных физических явлений, протекающих в асинхронном двигателе.

Предложенный способ описания кривой потерь в стали позволяет получить высокую точность, обладая при этом такими достоинствами, как простота и универсальность, а также возможность использования выражения  $\Delta P_c = \frac{x}{dE} \frac{dE}{dI}$  для дальнейших расчётов и построения

соответствующих систем управления.

Отметим также, что простота и точность предложенного способа делает его полезным при разработке численных программ, предназначенных для анализа статических и динамических характеристик асинхронных машин.

Разработанный метод описания кривых потерь в стали по отклонению таких величин, как ЭДС и ток намагничивания, не создает дополнительных трудностей и может использоваться для описания кривых потерь в стали при проектировании системы автономной генерации энергии для определения максимальной нагрузочной способности генераторной установки. Предложенный метод позволяет получить относительно простые зависимости с большой степенью точности для формирования задающих воздействий и использовать его для минимизации потерь регулируемого электропривода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кадочников А.И., Корзунин Г.С. Обобщенный параметр доменной структуры магнитно-мягких материалов и его использование для количественного описания семейства динамических петель гистерезиса // Физика твердого тела. – 2000. – Вып. 42, № 11. – С. 2054–2059.
2. Гречухин В.Н. Математическое описание петли гистерезиса // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 1. – С. 1–4.
3. Кандаурова Г.С. Природа магнитного гистерезиса // Соросов. образоват. журн. – 1997. – Т. 1. – С. 100–106.
4. Огарь В.А. К определению насыщения электротехнической стали асинхронных двигателей // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2004. – Вип. 15. – С. 91–94.
5. Тимофеев И.А. Удельные потери в ферромагнетике // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6 – С. 136–142.
6. Канов Л.Н. Схемное моделирование нелинейных электрических цепей переменного тока // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2002. – Вып. 41. – С. 151–155.
7. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.
8. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – 1987.
9. Костенко М.В. Электрические машины. – М.: Госэнергоиздат, 1944. – 815 с.
10. Бессонов Л.Л. Электрические цепи со сталью. – М.: Гостсхиздат, 1948. – 383 с.
11. Архангельский У.И. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин // Электричество. – 1950. – № 3. – С. 33–37.
12. Бандас А.М., Савиновский Ю.А., Ганцевская А.С. Определение оптимального полинома для аппроксимации основной кривой намагничивания // Изв. вузов. Электротехника. – 1966. – № 12. – С. 23–28.
13. Кузнецова Л.Н. Аппроксимация основных кривых намагничивания электротехнических сталей // Тр. МЭИ. – 1976. – Вып. 287. – С. 53–57.
14. Охаян Р.В. Аппроксимация кривой намагничивания стали квадратичной функцией // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 70–75.

15. Родькин Д.И. Мгновенная мощность индуктивности с насыщением // Електромашинобудування та електрообладнання. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Одеса, 2006. – Вип. 66. – С. 282–285.

16. Родькин Д.И., Огарь В.О., Ромашихин Ю.В. О разделении на составляющие потерь в стали электрических машин // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 495–500.

17. Огарь В.А., Родькин Д.И., Калинов А.П. Обоснование аналитической оценки потерь в насыщаемой стали асинхронного двигателя // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 4/2007 (45), част. 1. – С. 98–103.

18. Родькин Д.И., Мартыненко В.А., Барвинок Д.В., Гераскин А.С. Энергопроцессы в асинхронном двигателе с насыщенной сталью // Вісник КДПУ. – 2002. – Вип. 1/2002. – С. 174–180.

19. Boglietti A., Cavagnino A., Ionel D.M., Popescu M., Staton D.A. A General model to predict the iron losses in inverter fed induction motors, Vaschetto S. // IEEE Transactions on Industry Applications. – Iss. 46, № 5. – PP. 1882–1890. – ISSN 0093–9994.

20. Herranz Gracia M., Lange E., Hameyer K. Numerical Calculation of Iron Losses in Electrical Machines with a Modified Post-Processing Formula // Proc. of 16th Compumag, Aachen. – 2007.

21. Lotten T., Pillay M.P., Singampalli N.A. Lamination Core Loss Measurements in Machines Operating with PWM or Non-sinusoidal Excitation // Proc. Electr. Machines Drives Conf., Jun. 1–4, 2003. – Iss. 2. – PP. 743–746.

22. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.

23. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – С. 277.

## RATIONALE FOR THE RATIONAL METHOD FOR DETERMINING IRON LOSS WITH SATURATED

**V. Chenchvoy, D. Rodkin, V. Ogar**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: [sau@polytech.poltava.ua](mailto:sau@polytech.poltava.ua)

An analytical expression for the determination of the iron loss of asynchronous machine is convenient for practical use and requires much less computational cost, compared to existing methods. The proposed method provides a relatively simple dependence with great precision to form and use the master control systems minimize losses electric drive, and can also be used to describe curves of the iron loss in the design of an autonomous power generation to determine the maximum load capacity of the generator set.

**Key words:** induction motor, saturation, iron loss.

## REFERENCES

1. Kadochnikov A.I., Korzunin G.S. Generic parameter domain structure soft magnetic materials and its use for the quantitative description of the family dynamic hysteresis loops // *Solid State Physics*. – 2000. – Iss. 42, № 11. – PP. 2054–2059. [in Russian]

2. Grechukhin V.N. Mathematical description of the hysteresis loop // *Transaction ISPU*. – 2005. – Iss. 1. – PP. 1–4. [in Russian]

3. Kandaurova G.S. Nature of the magnetic hysteresis // *Soros. Educat. Journal*. – 1997. – Т. 1. – PP. 100–106. [in Russian]

4. Ogar V.A. By definition, the saturation of electric steel induction motors // *Bulletin of*



- Kirovohrad National Technical University*. – 2004. – Iss. 15. – PP. 91–94. [in Russian]
5. Timofeev I.A. Specific losses in ferromagnet // *Modern problems of science and education*. – 2007. – № 6 – PP. 136–142. [in Russian]
  6. Kanov L.N. Schematic simulation of nonlinear circuits AC // *Bulletin SevGTU. Ser. Computer Science, Electronics, Communications: Collection of Scientific Papers*. – Sevastopol, 2002. – Iss. 41. – PP. 151–155. [in Russian]
  7. Petrov L.P. Launching control and inhibition of induction motors. – *Moscow: Energoizdat*. – 1981. – 184 p. [in Russian]
  8. GOST 7217-87. *Rotating electrical machines. Induction motors. Test methods*. – 1987. [in Russian]
  9. Kostenko M.V. *Electrical Machines*. – Moscow: Gosenergoizdat, 1944. – 815 p. [in Russian]
  10. Bessonov L.L. *Electrical circuits with steel*. – Moscow: Gostskhizdat, 1948. – 383 p. [in Russian]
  11. Archangelskiy U.I. Analytical expression of the magnetization curve of electrical machines // *Electricity*. – 1950. – № 3. – PP. 33–37. [in Russian]
  12. Bandas A.M., Savinovskij J.A., Gantsevskaya A.C. Determination of optimal polynomial approximation for basic magnetization curve // *Math. universities. Electrical Engineering*. – 1966. – № 12. – PP. 23–28. [in Russian]
  13. Kuznetsova L.N. Approximation of the magnetization curves of the main electrical steels // *Bulletin MEI*. – 1976. – Iss. 287. – PP. 53–57. [in Russian]
  14. Okhayan R.V. Approximation of the magnetization curve were sending a quadratic function // *Electricity*. – 1998. – № 4. – PP. 70–75. [in Russian]
  15. Rodkin D.I. Instantaneous power inductor with saturation // *Electrical machinery and electrical equipment. Problems of automated electric. Theory and Practice*. – Odesa, 2006. – Iss. 66. – PP. 282–285. [in Russian]
  16. Rodkin D.I., Ogar V.O., Romashihin Yu.V. Separation of components on the iron loss of electrical machines // *Transaction Dneprodzerzhinsk State Technical University*. – Dneprodzerzhinsk: DSTU, 2007. – PP. 495–500. [in Russian]
  17. Ogar V.A., Rodkin D.I., Kalinov A.P. Justification analytical evaluation of losses in saturated steel induction motor // *Transaction Kremenchuk State Polytechnic University*. – Kremenchuk: KSPU, 2007. – Iss. 4/2007 (45), part 1. – PP. 98–103. [in Russian]
  18. Rodkin D.I., Martynenko V.A., Barvynok D.V., Geraskin A.S. Energoprotsess in asynchronous motor with a saturated steel // *Transaction KSPU*, 2002. – 1/2002. – PP. 174–180. [in Russian]
  19. Boglietti A., Cavagnino A., Ionel D.M., Popescu M., Staton D.A. A General model to predict the iron losses in inverter fed induction motors, Vaschetto S. // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – Iss. 46, № 5. – PP. 1882–1890. – ISSN: 0093–9994.
  20. Herranz Gracia M., Lange E., Hameyer K. Numerical Calculation of Iron Losses in Electrical Machines with a Modified Post-Processing Formula // *Proc. of 16th Compumag, Aachen*. – 2007.
  21. Lotten T., Pillay M.P., Singampalli N.A. Lamination Core Loss Measurements in Machines Operating with PWM or Non-sinusoidal Excitation // *Proc. Electr. Machines Drives Conf.*, Jun. 1–4, 2003. – Iss. 2. – PP. 743–746.
  22. Tamm I.E. *Fundamentals of the theory of electricity*. – Moscow: Nauka, 1976. – 616 p. [in Russian]
  23. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. – Moscow: Nauka, 1978. – P. 277. [in Russian]



Ченчевой Владимир Витальевич,  
ассистент каф. «Системы автоматического управления и электропривод»  
КрНУ,  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,  
Тел. (05366) 3-11-47,  
E-mail: [saue@kdu.edu.ua](mailto:saue@kdu.edu.ua)



Родькин Дмитрий Иосифович,  
д.т.н., зав. каф. «Системы автоматического управления и электропривод»  
КрНУ,  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,  
Тел. (05366) 3-11-47,  
E-mail: [saue@kdu.edu.ua](mailto:saue@kdu.edu.ua)



Огарь Вита Александровна,  
к.т.н., доц. каф. «Системы автоматического управления и электропривод»  
КрНУ,  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,  
Тел. (05366) 3-11-47,  
E-mail: [saue@kdu.edu.ua](mailto:saue@kdu.edu.ua)

Стаття надійшла 11.02.2013  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Чорним О.П.