



**ЧУМАК В.В.**, канд. техн. наук,  
**ТИМОЩУК О.Л.**, канд. техн. наук,  
**КОВАЛЕНКО М.А.**, канд. техн. наук,  
 національний технічний університет  
 «Київський політехнічний інститут».

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА МАЛОМОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

*Разработано трехмерную полевою математическую модель для оценки качества шихтованного магнитного сердечника статора мало мощного гидрогенератора на постоянных магнитах. Проведено моделирование повреждений стали сердечника статора на основе моделирования переходных электромагнитных явлений в сердечнике статора. Результаты моделирования целесообразно использовать в качестве методологической основы, методического обеспечения для систем контроля, диагностики и оценки качества сердечника статора, а также для создания базы знаний различных повреждений.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* шихтованный магнитный сердечник, гидрогенератор на постоянных магнитах, диагностика, база знаний, повреждения.

**В**опрос надежности электрогенераторов, в частности гидрогенераторов малой мощности, является важным экономическим показателем, поскольку от этого показателя зависит надежность работы энергосистемы. Это особенно актуально в европейских странах, где существует государственная программа поддержки нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Исходя из сложившейся экономической ситуации в стране и в целом в секторе электротехнической промышленности тема вопроса ремонта электрогенераторов является актуальной. Необходимо, с одной стороны, повысить надежность работы электрогенераторов малой мощности и увеличить время безремонтной работы, с другой — увеличить послеремонтную надежность.

Для большинства видов электротехнических приборов надежность работы связана прежде всего с надежностью их изоляции. Поэтому наряду с контролем качества витковой изоляции обмоток весьма актуальной задачей является контроль качества межлистовой изоляции магнитопровода электрических генераторов.

Основной функцией магнитопровода является магнитная связь, концентрация и проведение магнитного потока. Кривая намагничивания и магнитная проницаемость стали — ее главные характеристики. От этих показателей зависит величина тока намагничивания, мощность системы возбуждения, конечная стоимость генератора. Магнитная проницаемость зависит от состава и структуры материала, которые определяются процессом производства.

В магнитных системах переменного тока прохождение по магнитопроводу переменного магнитного поля создает побочный эффект — потери

на гистерезис и вихревые токи. Первые определяются составом и структурой стали и зависят от выбранной марки стали и технологии обработки. Вторые определяются как маркой стали, так и состоянием межлистовой изоляции магнитопровода.

Именно эта изоляция может повреждаться как в процессе эксплуатации, так и при ремонтных работах. В отдельных случаях при значительных нарушениях технологии производства изоляция может повредиться даже при изготовлении магнитопроводов.

Основные типы повреждений можно разбить на две группы [1]:

1. Интегральные дефекты изоляции — точечные перекрытия, распределены по ширине пакета по случайному закону;
2. Локальные дефекты — местные короткозамкнутые зоны перекрывают часть пакета, как правило, расположены на активной поверхности магнитопровода и не распространяются в глубину.

При наличии поврежденной межлистовой изоляции магнитная проводимость и ток намагничивания практически не меняется. Однако, при этом резко увеличиваются вихревые токи, которые могут циркулировать по дефектным контурам. В то же время потери на гистерезис практически сохраняют свою величину. На промышленных частотах определяющей является составляющая гистерезисных потерь, которая в несколько раз превышает потери на вихревые токи.

При наличии дефектов увеличивается составляющая потерь на вихревые токи. Для значительного увеличения удельных потерь в магнитопроводе потери на вихревые токи должны увеличиться в десятки раз, то есть если бы удалось создать метод (прямой или косвенный) оценки ин-



тенсивности вихревых токов, то от него не требовалось бы высокая чувствительность для того, чтобы оценить увеличение потерь в магнитопроводе.

Увеличение потерь в стали приводит не столько к ухудшению рабочих характеристик (растет только активная составляющая тока холостого хода), но и к ухудшению условий работы (ухудшение теплового режима).

Поскольку магнитопровод является основной охлаждающей поверхностью, то увеличение потерь в стали значительно увеличивает перегрев меди, особенно активной части обмотки. Для оценки увеличения потерь при сохранении тепловой прочности конструкции и номинальной нагрузки необходим индивидуальный расчет для каждой машины.

При наличии локальных дефектов увеличение общих потерь может быть незначительным, но за счет локального выделения тепла имеют место местные перегревы, которые могут вывести из строя изоляцию обмоток. В этом случае дать общую оценку допустимых границ нарушений достаточно трудно, так как эффект зависит не только от степени развитости дефекта, но и от габаритов и нагрузки магнитной системы, места и характера дефекта.

Для оценки состояния межлистовой изоляции и возможного влияния интегральных и локальных дефектов, необходимо выбрать метод измерения, который требует наиболее простой и надежной аппаратуры измерения возможного информационного сигнала.

Таким информационным сигналом теоретически могут служить следующие величины:

1. Сопротивление изоляции;
2. Потери в магнитопроводе;
3. Величины, связанные с прямыми сигналами.

В современных конструкциях электрогенераторов, за исключением трансформаторов, измерение сопротивления межлистовой изоляции невозможно, так как есть электрическая связь между листами за счет сборной конструкции — сварочных швов, наборных призм, стяжек и т.п.

На сегодняшний день, как правило, оценку интегральных дефектов проводят используя измерения удельных потерь в магнитопроводе[2]. При этом, в процессе изготовления или ремонта на замкнутый магнитопровод наматывают мало-витковую обмотку возбуждения, питают переменным током от низковольтного источника и измеряют потери. Несмотря на простоту, этот метод имеет ряд недостатков— необходимость достаточно мощного источника питания, набора измерительной аппаратуры, намотки обмотки возбужде-

ния и необходимость проводить серию расчетов для определения удельных потерь, то есть необходимо приводить потери к единице массы и индукции, которые также необходимо определить. Влияние локальных дефектов при этом оценивается как составляющая интегральных потерь.

Необходимо отметить, что определение потерь в магнитопроводе является общепризнанным методом определения качества магнитопроводов[2]. По этой причине неоднократно принимались попытки улучшения метода определения потерь, например, метод калиброванного ротора[3], аппарат Эйнштейна[4] и различные его модификации[5].

Общим недостатком методов, основанных на измерении потерь в магнитопроводе являются высокие затраты труда и необходимость использования комплекта измерительной аппаратуры. Является невозможным создание на основе этих методов компактной переносной измерительной аппаратуры контроля качества магнитопроводов, в которой нуждаются ремонтные электроцеха.

Учитывая вышеуказанные трудности необходимо найти любую физическую величину, которая могла бы использоваться как информационный сигнал. Поэтому можно утверждать, что при нарушении межлистовой изоляции в первую очередь растут вихревые токи, а искомым сигналом должен характеризовать интенсивность вихревых токов по дефектным контурам. В данной работе предложено использовать анализ переходного процесса в шихтованном магнитном сердечнике мало-мощного генератора при изменении потока в магнитопроводе или в зонах локальных дефектов.

Для упрощения измерительной системы и уменьшения влияния полей рассеяния предполагается рассматривать не процесс включения обмотки возбуждения и установления постоянного магнитного потока, а процесс отключения обмотки возбуждения. Это дает несколько преимуществ: во-первых, обмотка возбуждения используется для создания переменного магнитного потока в сердечнике; во-вторых, может быть использована как датчик производной потока во времени. Анализ кривой переходного процесса дает характеристический параметр короткозамкнутых контуров (в данном случае контуров вихревых токов) — их постоянную времени  $T_z$ . Необходимо проанализировать связь между величинами, которые нас интересуют — величиной вихревых токов или удельных потерь в стали магнитопровода и постоянной времени при переходных процессах для различных вариантов дефектности.



Таким образом, разработка индукционных методов контроля качества шихтованных магнитопроводов является весьма актуальной задачей. Переходный процесс при отключении тока в обмотке возбуждения можно использовать и для увеличения уровня индуцированного напряжения при контроле качества витковой изоляции обмоток, но это является другой задачей.

Для обеспечения среза тока необходимо использовать коммутационные элементы, обеспечивающие время отключения тока значительно меньше, чем время переходного процесса в магнитопроводе.

**Математическая модель.**

За основу при моделировании взято конструкцию магнитоэлектрического генератора малой мощности на постоянных магнитах, проект которого был разработан для высокоэффективных автономных энергоустановок: ГЭС, ветровых установок, тепловых и т.д. [6]. Продольный эскиз генератора приведено на Рис. 1.

Синхронный генератор (СГ) с магнитным шунтом на роторе, выполнен на базе серийного асинхронного двигателя (АД) АИР100L4.

На статоре генератора размещена трехфазная распределенная обмотка якоря. Ротор СГ состоит из двух частей: радиально намагниченных постоянных магнитов ( $2p = 4$ ), которые создают рабочий магнитный поток; магнитного шунта (вспомогательная часть СГПМ), предназначенного для стабилизации внешней характеристики СГПМ и для целей регулирования выходного напряжения в широких пределах.

Реализация математической модели проводится в программном пакете COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. Расчетная область модели состоит из пакета шихтованного сердечника статора исследуемого генератора (Рис. 2).

Для получения однозначного решения на границах расчетной области задаются граничные условия первого рода:

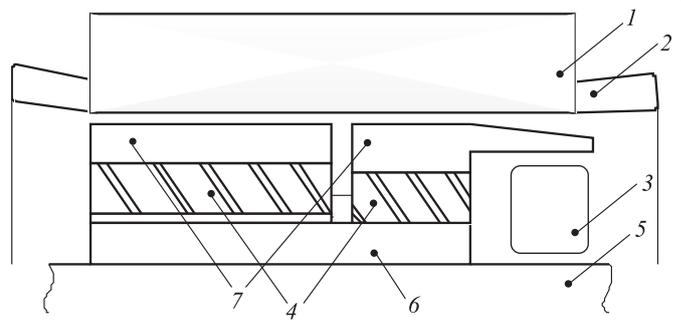
$$A(x, y, z, t) |_{G_1} = 0, \quad \{x, y, z\} \in G_1. \quad (1)$$

Это означает принятие предположения об отсутствии магнитных потоков, проходящих через выделенную внешнюю границу  $G_1$  расчетной области.

При расчете магнитного поля используется нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение для векторного магнитного потенциала  $A$  в электропроводящей среде:

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu} (\nabla \cdot \vec{A}) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} + \gamma \vec{V} \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) = -\vec{J}_{сгор}, \quad (2)$$

де  $\mu, \sigma$  – магнитная проницаемость и электро-



**Рис. 1. Эскиз СГПМ с магнитным шунтом:**  
 1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка якоря;  
 3 – подмагничивающая обмотка; 4 – постоянные магниты;  
 5 – вал; 6 – втулка; 7 – полюсные наконечники.

проводность;  $V, J_{сгор}$  – вектора скорости движения среды и внешней плотности тока (плотность тока в обмотке возбуждения);  $\nabla$  – дифференциальный оператор Набла.

Распределение электромагнитного поля расчетной области, при отсутствии движущихся частей описывается следующим уравнением:

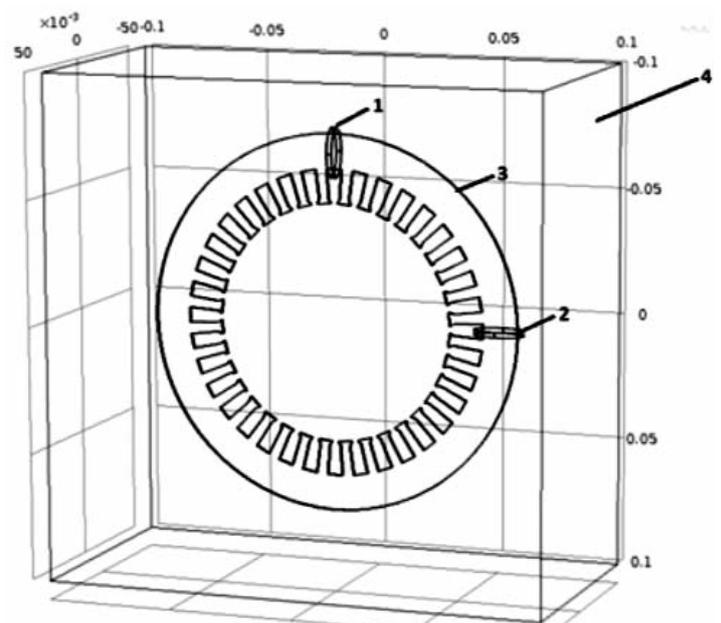
$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot H = J_e, \quad B = \nabla \cdot A, \quad \nabla \cdot B = 0, \quad (3)$$

где  $A$  – векторный магнитный потенциал.

Ток в обмотке возбуждения задается как функция времени с некоторыми постоянными величинами и принимает вид:

$$I(t) = I_m (1 - e^{(-t/\tau)}), \quad (4)$$

где  $I_m$  – величина на установившемся тока в обмотке возбуждения;  $T$  – постоянная времени отключения тока в обмотке возбуждения (скорость отключения тока в



**Рис. 2. Расчетная область модели:**  
 1 – обмотка возбуждения; 2 – измерительная обмотка;  
 3 – пакет сердечника статора, который состоит из изолированных друг от друга листов; 4 – расчетная область модели  $G_1$  в виде прямоугольника.

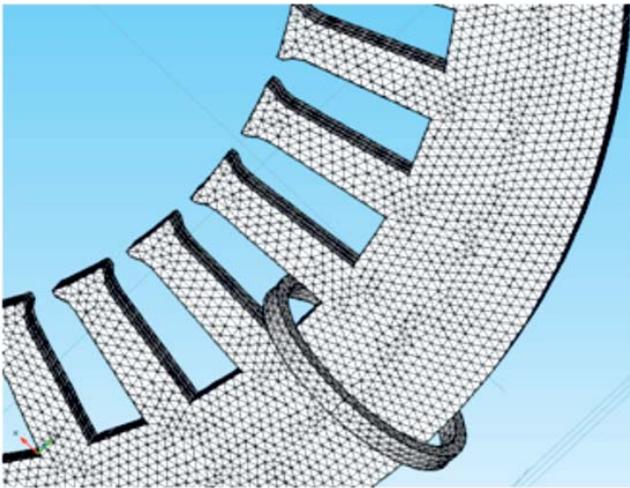


Рис. 3. Фрагмент сетки конечных элементов

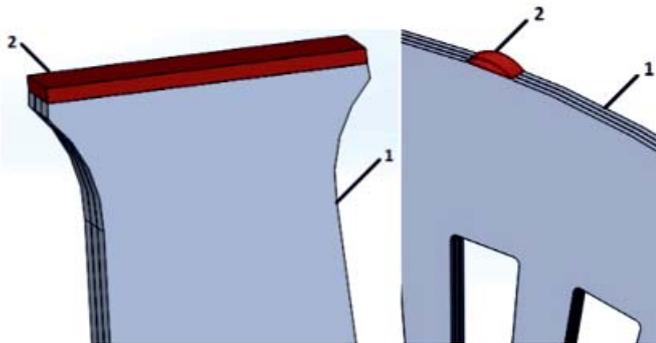


Рис. 4. Фрагменты дефектных зон стали статора:  
1 – магнитопровод статора; 2 – электропроводная область,  
которая замыкает крайние листы пакета статора в области  
зубцов и спинки статора.

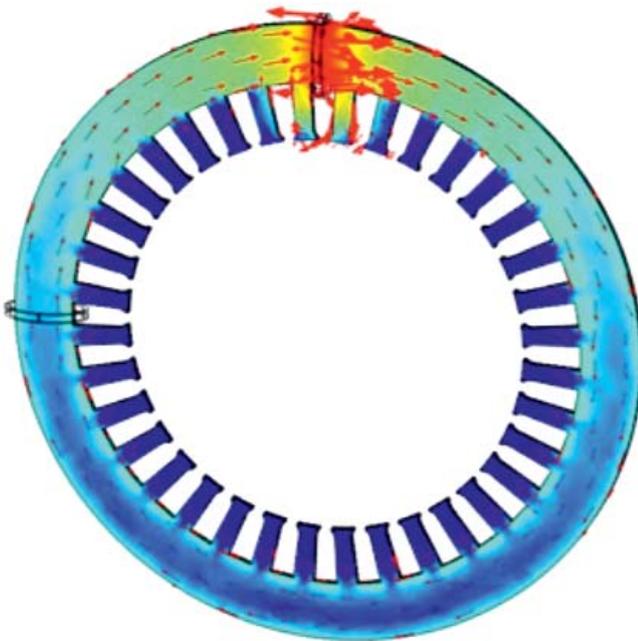


Рис. 5. Распределение магнитной индукции и вихревых токов в  
расчетной области

обмотке).

Тогда, плотность тока в обмотках  $J_{стоп}(t)$  определяется по следующему выражению:

$$J_{стоп}(t) = \frac{W_1 I(t)}{S_k} e_k, \quad (5)$$

где  $W_1$  – количество витков в обмотке возбуждения;  $S_k$  – эквивалентная площадь поперечного сечения обмотки возбуждения.

Величина индуцируемой ЭДС в измерительной обмотке является функцией времени  $e_{uo}(t)$  и определяется по следующему выражению:

$$e_{uo}(t) = j \omega \frac{W_{об} l_{об}}{V_{uo}} \int \vec{A} \cdot \vec{\tau} dt, \quad (6)$$

где  $V_{uo}$  – объем измерительной обмотки,  $l_{об}$  – средняя длина витка обмотки, при этом величина  $W_{об} \cdot l_{об}$  равна полной длине проводника обмотки,  $\vec{\tau}$  – единичный вектор, направленный вдоль проводника обмотки.

Для расчета величины индуцированной ЭДС самоиндукции в первичной обмотке, как функции времени, используется закон электромагнитной индукции, в котором индуцированная ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока и количества витков обмотки:

$$E_{in}(t) = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7)$$

Соответствующим частям расчетной области (Рис. 2) задаются материалы и их характеристики (электропроводность, магнитная и диэлектрическая проницаемость). Магнитопровод исследуемого генератора набран из пакета пластин толщиной 0,5 мм стали марки 2013. Для нее задается кривая намагничивания  $B = f(H)$ .

Фрагмент сетки конечных элементов исследуемого магнитопровода приведен на Рис. 3.

Сгенерированная сетка исследуемого магнитопровода имеет следующее количество элементов: 1017090 тетраэдров, 762468 элементов на плоских границах области, 142660 граничных элементов, 12966 линейных элементов.

На Рис. 4 представлено модели повреждения зубцов стали статора и спинки статора (сварной шов).

#### Результаты моделирования.

На Рис. 5 приведено распределение магнитной индукции (фон) и вихревых токов (стрелки) в расчетной области (в сердечнике статора).

Максимальное значение магнитной индукции в момент отключения тока в обмотке составляет  $B_{max} \approx 1,72$  Тл в месте расположения обмотки возбуждения; минимальное значение магнитной индукции  $B_{min} \approx 1,15$  Тл (в диаметрально противоположном направлении); усредненное значение индукции в месте расположения измерительной обмотки  $B = 1,07$  Тл.

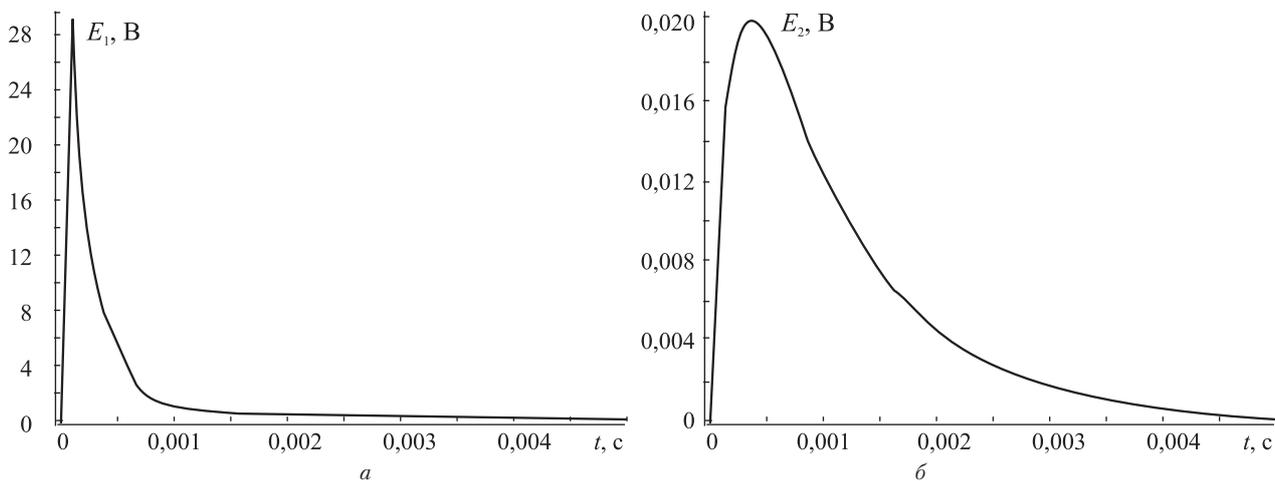


Рис. 6. Сигналы обмоток при бездефектно ммагнитопроводе

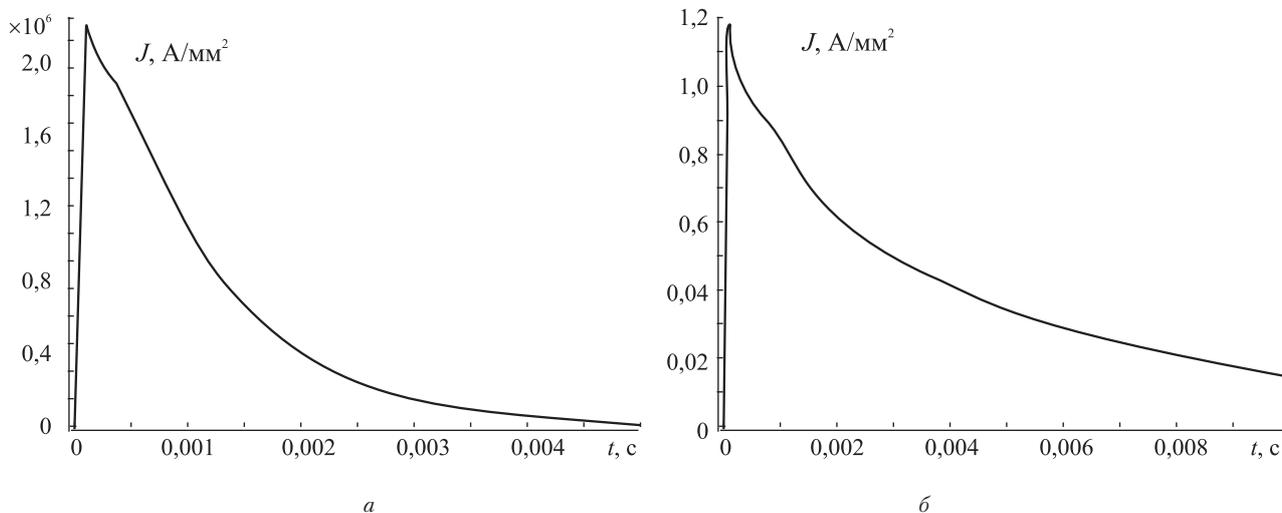


Рис. 7. Затухание вихревых токов в сердечнике в зависимости от его состояния

На Рис. 6 показано временную зависимость ЭДС самоиндукции в обмотке возбуждения и ЭДС в измерительной обмотке при бездефектном магнитопроводе.

Пиковое значение ЭДС в обмотке возбуждения составляет  $\approx 29$  В, в то время как на измерительной обмотке оно составляет около 0,02 В. Время затухания ЭДС в измерительной обмотке больше, поскольку ЭДС в ней зависит от времени затухания индуцированных токов в сердечнике, которые «стремятся» поддерживать постоянным затухающий магнитный поток. В момент отключения тока в обмотке возбуждения начинается переходной процесс, который сопровождается затуханием токов в магнитопроводе статора. Время затухания этих токов зависит от качества магнитопровода и наличия в нем дефектов. На Рис. 7 показано зависимость амплитуды вихревых токов в сердечнике от времени для двух принципиальных случаев: при целом сердечнике статора (Рис. 7, а) и при наличии сварного шва на спинке статора (Рис. 7, б).

Время затухания вихревых токов при бездефектном магнитопроводе составляет  $T_3 \approx 0,0022$  с,

при наличии дефекта спинки статора постоянная времени затухания увеличивается и составит  $T_3 \approx 0,011$  с. Это приведет к увеличению время затухания ЭДС в измерительной обмотке и уменьшению ее амплитуды, что является достоверным информационным признаком для определения качества сердечника и наличия в нем дефектов.

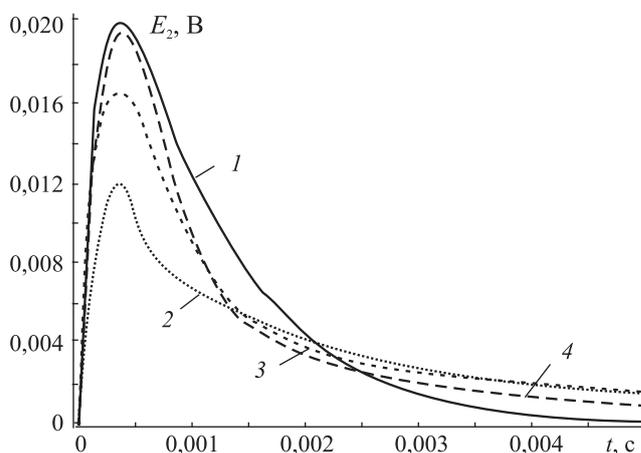


Рис. 8. Результаты моделирования различных повреждений магнитопровода статора



Таблиця 1. Значення коефіцієнтів для досліджуваного генератора

	1	2	3	4
$E_2, \text{В}$	0,02	0,012	0,0165	0,0195
$T_2, \text{с}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
$k_a, \text{в.о.}$	1	0,6	0,825	0,975
$k_T, \text{в.о.}$	1	3,75	2,125	1,031

На Рис. 8 приведено результаты моделирования для различных повреждений магнитного сердечника статора исследуемого генератора для стали марки 2013. Результаты представлены в виде зависимости ЭДС измерительной обмотки как функции времени  $E_2 = f(t)$ .

На Рис. 8 показаны следующие кривые: 1 – бездефектный магнитопровод; 2 – полное замыкание листов; 3 – дефект спинки; 4 – дефект зубца.

Для оценки качества сердечника вводятся дополнительные коэффициенты:

– коэффициент амплитуды:

$$k_a = E_{2д} / E_2, \quad (8)$$

где  $E_{2д}$  – значение индуцированной ЭДС при наличии дефекта сердечника;  $E_2$  – значение индуцированной ЭДС бездефектного сердечника.

– коэффициент затухания:

$$k_T = T_{2д} / T_2, \quad (9)$$

где  $T_{2д}$  – постоянная времени переходного процесса дефектного сердечника;  $T_2$  – постоянная времени переходного процесса бездефектного сердечника.

В Табл. 1 приведены значения индуцированных ЭДС во вторичной обмотке, продолжительность переходного процесса, коэффициент амплитуды и коэффициент затухания для марки стали 2013 исследуемого генератора.

### Выводы.

Разработано полевою математическую модель для исследования переходных процессов в магнитном сердечнике статора маломощного гидрогенератора с унифицированным магнитным сердечником. Модель позволяет определить рас-

пределение электромагнитного поля и вихревых токов в сердечнике, а также рассчитать величину индуцированной ЭДС измерительной обмотки как функцию времени при переходном процессе. В рамках данной модели разработаны модели дефектов шихтованного магнитного сердечника: дефект полного замыкания листов, дефект спинки и дефект зубца.

Получены расчетные кривые для индуцированной ЭДС измерительной обмотки при различных вариантах повреждений сердечника статора исследуемого генератора для стали марки 2013. Анализ кривых показывает, что при появлении незначительного дефекта, характер распределения ЭДС измерительной обмотки значительно меняется. Например, при повреждении спинки магнитопровода отклонение коэффициентов находится в пределах 0,77 – 0,86, что достаточно для оценки степени повреждения магнитопровода, его технического состояния и фиксации такого изменения измерительными приборами.

Результаты работы целесообразно использовать в качестве основы для разработки систем и методического обеспечения контроля, диагностики и оценки качества магнитного сердечника статора генераторов малой и средней мощности.

### ЛИТЕРАТУРА.

1. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. – М.: Энергия, 1967. – 208 с.
2. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. – М.: Высшая школа, 1990. – 255 с.
3. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техника, 1983. – 200 с.
4. Жабоев А.М. Получение испытательных ЭДС при коммутации тока в системе со стальным магнитопроводом / Жабоев А.М., Самойленко В.Н., Чумак В.В. // Вести. Киев. Политехн. институт. Электротехника, 1989. – 45–46 с.
5. Sato T., Sakkaki Y. Discussion on eddy current loss under square wave voltage excitation / IEEE Trans. on Magnetics, 1988, v. MAG – 24, No.6, pp. 2904–2906.
6. Чумак В.В. Математическое моделирование генератора с комбинированным возбуждением автономной энергоустановки / В.В. Чумак, М.А. Коваленко, А.И. Пономарев // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2015. – №31. – С. 76 – 84.

© Чумак В.В., Тимошук О.Л., Коваленко М.А., 2016

