

Г.В. БЕРБЕРЯН

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ КОНТРОЛЯ АСИММЕТРИИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА МОЩНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Системы контроля воздушного зазора, используемые в настоящее время, обладают рядом недостатков и поэтому не удовлетворяют полностью предъявляемым к ним требованиям. В связи с этим предпринята попытка разработки нового метода, основанного на процессе распространения и отражения инфракрасного излучения, позволяющего, на наш взгляд, решить существующую проблему во всех ее аспектах.

Ключевые слова: контроль, подвижная и неподвижная асимметрии воздушного зазора, ИК-излучение, линза, фильтр, модулятор.

Асимметрия магнитного поля в воздушном зазоре мощных гидрогенераторов, как известно, возникает вследствие асимметрии воздушного зазора и короткозамкнутых витков в обмотках возбуждения полюсов. Первое обусловлено неправильными формами расточки статора или огибающей полюсов ротора, либо совместным их действием. Для выяснения возможных последствий асимметрии воздушного зазора, например, магнитной асимметрии, принято рассматривать гармонический состав, определяемый пространственным разложением в гармонический ряд измеренных тем или иным способом существующих форм расточки статора и огибающей полюсов ротора. В этом случае первая гармоника разложения характеризует эксцентриситет статора (расцентровка), а для ротора – несовпадение его геометрического центра с центром его вращения, в то время как вторая гармоника характеризует эллиптичность статора или ротора и т.д. [1].

Для удобства анализа любых методов контроля указанной асимметрии целесообразно исходить из принципа наложения, смысл которого заключается в рассмотрении влияния на возникающую асимметрию со стороны статора и ротора в отдельности. В первом случае за идеальный цилиндр и без короткозамкнутых витков в обмотках полюсов принимают ротор, а во втором случае – напротив, статор, в котором отсутствуют пазы и зубцы. Допущение такой модели позволяет считать, что асимметрия статора является причиной возникновения в спектре кривой магнитного поля пространственных низкочастотных гармоник, не зависящих от углового положения ротора.

В связи с этим асимметрию магнитного поля, вызванную влиянием неправильной формы статора, условно называют “неподвижной”. И наоборот, асимметрию, обусловленную влиянием неправильной формы ротора и наличием короткозамкнутых витков, по существу, вращающуюся вместе с ротором, называют “вращающейся”.

Актуальность проблемы разработки новых или совершенствования существующих методов рассматриваемого контроля объясняется необходимостью своевременного предсказания появления и обнаружения целого ряда нежелательных

последствий, в конечном итоге приводящих к отказу гидрогенератора в случае несвоевременного их устранения. Даже неполный перечень всех последствий, таких как касание листами активной стали полюсов ротора и пробой изоляции обмотки статора, вибрация и разрушение опорных конструкций и фундамента, повышенный местный и общий нагрев и натирания сегментов направляющих подшипников, может служить убедительным аргументом, подчеркивающим важность рассматриваемой проблемы, и позволяет сделать вывод о принципиально широких возможностях использования ряда физических процессов для обнаружения возникшей асимметрии. Однако в настоящее время существует только три практически реализуемых способа – электромагнитный, механический и оптический с широтно-импульсной модуляцией, которым свойственны существенные недостатки.

Главный недостаток электромагнитного способа, в основе которого лежит явление наведения в установленном на статоре измерительном витке или датчике индукции ЭДС, возбужденной за счет магнитной асимметрии, заключается в том, что из двух асимметрий магнитного поля – подвижной и неподвижной, удается обнаружить только первую из них.

Недостатки механического способа заключаются в том, что для обнаружения магнитной асимметрии производят измерение воздушного зазора на остановленном гидрогенераторе, что само по себе нежелательно. Кроме того, не учитываются изменения зазоров при вращающемся и остановленном роторе из-за деформации конструктивных элементов ротора в радиальном направлении, возникающей только при вращении, а также смещения в этом же направлении отдельных пластин пакетов стали статора. Все это приводит в ряде случаев к погрешности механических измерений, достигающей порядка 0,5 мм, что может быть соизмеримо с отклонениями воздушного зазора под полюсами.

Основным недостатком оптического способа является то, что в этой системе используется модулятор сложной конфигурации, осаждение на котором различных аэрозолей органического и неорганического происхождения приводит к искажению геометрии указанной конфигурации, вследствие чего могут возрасти погрешности измерения.

Реализуемый на базе предлагаемого метода способ обнаружения магнитной асимметрии, основанный на использовании инфракрасного (ИК) излучения и уравнения дальности радиометрии, выгодно отличается от вышеуказанных способов тем, что в нем отсутствуют все перечисленные недостатки, характерные каждому из них.

Для выяснения сущности метода, очевидно, необходимо прежде всего представить принцип измерения воздушного зазора.

Схема измерения воздушного зазора при неподвижной магнитной асимметрии представлена на рис.

В соответствии с приведенной схемой для измерения воздушного зазора при неподвижной асимметрии на ободу ротора в точке А между полюсами I и II устанавливается ИК-излучатель постоянной силы (диодный лазер) с узким лучом с диаметром не более 0,1...0,2 мм и с расходимостью не более нескольких секунд так, чтобы луч на всем пути распространения можно было бы считать по своей форме неизменным.

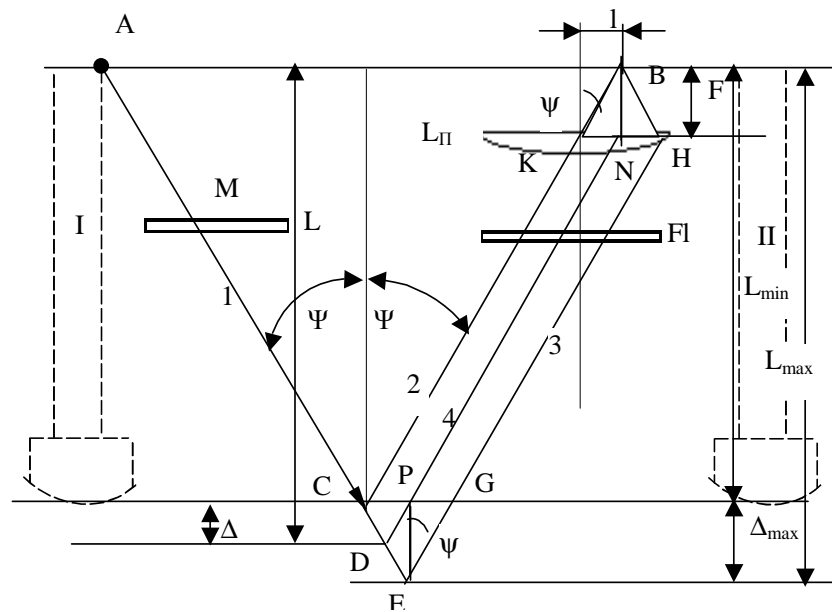


Рис.1

Кроме того, между теми же полюсами на определенном удалении от излучателя устанавливается пироприемник ИК-излучения ППИК, воспринимающий это излучение, проходящее через модулятор М и инфракрасный широкополосный фильтр F в полосе волн длиной $\lambda = 8...12 \text{ мкм}$ или больше, соответствующей интервалу температур $300...340 \text{ К}$ или ниже. Перед ППИК установлена линза $L_{\text{п}}$ (выпукло-плоская) ИК-излучения таким образом, чтобы луч 1, отражаясь от статора в точках С и Е, соответствующих уровням минимального и максимального удаления ротора от статора, попадал на линзу $L_{\text{п}}$ через ИК-фильтр FL вдоль параллельных лучей 2 и 3, собираемых в точке В ее фокальной плоскости. Для измерения используется короткофокусная линза, например, с фокусным расстоянием $F=0,1 \text{ м}$ так, что при малых углах $\psi \leq 10^\circ \approx 0,17 \text{ рад}$ значение $CG = 2CP = 2PG = 2(L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) \text{tg} \psi$, где $\Delta_{\text{max}} \leq 10^{-3} \text{ м}$. Линза диаметром $D_0 \leq 0,5 \Delta_{\text{max}}$ устанавливается так, чтобы ее ось оказалась параллельной поверхности статора, что допустимо при диаметре статора, во много раз превосходящем $D_0 \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, и, кроме того, отраженный луч 2 совпадал с оптической осью СВ или проходил параллельно ей со смещением не более десятых долей миллиметра. В этом случае лучи 2 и 3, пройдя через линзу, сфокусируются в точке В так, что $l = F \cdot \text{tg} \psi \approx F \cdot \psi = 10^{-2} \cdot 0,17 \text{ м} = 1,7 \text{ мм}$ при $CP = PG = \Delta_{\text{max}} \cdot \text{tg} \psi \approx \Delta_{\text{max}} \cdot \psi = 10^{-2} \cdot 0,17 \text{ м} = 1,7 \text{ мм}$, а т.к. $KN = CP$ и $NH = PG$, то $NB \approx KB = NB = F/\text{tg} \psi = 10^{-2}/0,93 \approx 1,07 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. На некотором промежуточном уровне L удаления обода ротора от статора, соответствующем зазору $\Delta = \Delta_{\text{max}}/2$, луч 1 отразится в точке D вдоль луча, параллельного лучам 2 и 3. Таким образом, при отражении крайних 2 и 3, а также промежуточного 4 лучей в точках С, Е и D соответственно расстояния от этих точек отражения до точки В вдоль путей распространения указанных лучей определяются следующим образом: $CK+KB$, $EG+GH+NB$ и $DP+PN+NB$. Принимая во

внимание, что $CK=PN=GH$, $KB=BH \approx NB$, $DP=DR/\cos\psi=\Delta/\cos\psi$ и $EG = PE/\cos\psi=\Delta_{\max}/\cos\psi$, можно записать: $S_1=CK+KB=\text{const}$, $S_2=S_1+\Delta_{\max}/\cos\psi$ и $S_3=S_1+\Delta/\cos\psi$. При этом для произвольного зазора Δ , такого, что $0 \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$, получим

$$S = a + b\Delta, \quad (1)$$

где $a=S_1=\text{const}$ и $b=1/\cos\psi=\text{const}$.

Это означает, что указанные расстояния в зависимости от зазора (изменяются линейно. Лучи, отраженные от различных точек поверхности статора, можно рассматривать как исходящие от вторичных точечных источников, помещенных в этих точках. При $J=\text{const}$ и $\rho=\text{const}$, где ρ - коэффициент отражения поверхности статора, для этих точек можно записать [2]:

$$J = J = \frac{2R^2(\beta\Delta f)^{1/2}}{\pi D_0(NA)D \cdot \alpha_a \cdot \alpha_0} \left(\frac{V_s}{V_n} \right) \left(\frac{V_s}{V_p} \right), \quad (2)$$

где R - расстояние от точки отражения до точки B , m ; 2β - угол зрения линзы, рад; D_0 - диаметр линзы, m ; NA - числовая апертура линзы, безразмерное число; α_a - коэффициент пропускания ИК-излучения воздушного пространства между статором и ротором, безразмерный коэффициент; α_0 - коэффициент пропускания ИК-излучения оптики, фильтра, модулятора и защитного стекла окна ППИК, безразмерный коэффициент; V_s - максимальная амплитуда сигнала на выходе ППИК, В; V_p - амплитуда импульса напряжения на выходе ППИК, В; V_n - среднеквадратичное напряжение шумов (джонсоновых) на выходе ППИК, В; Δf - полоса пропускания схемы обработки сигнала на выходе ППИК, Гц, определяемая как $\Delta f = 1/4\tau$, причем τ - постоянная времени схемы обработки выходного сигнала ППИК, с; V_s/V_n - отношение сигнал-шум, безразмерная величина; D - обнаружительная способность детектора ППИК, $m \cdot Гц^{1/2} \cdot В^{-1}$.

Отношение V_p/V_s в (2) характеризует степень уменьшения сигнала на выходе детектора, обусловленного отличием формы выходного импульса детектора от синусоидальной. Это связано с тем, что в отношении V_s/V_n числитель и знаменатель должны быть выражены в виде среднеквадратичных значений, причем за среднеквадратичное значение выходного сигнала детектора берется значение амплитуды выходного импульса V_p , т.е. $V_p=V_s$, а это допустимо только для вышеуказанной формы и бесконечно широкой полосы пропускания. При прямоугольной импульсной модуляции ИК-излучения выходные импульсы детектора содержат весьма широкий спектр частот при ограниченной полосе пропускания схемы обработки указанных сигналов. Поэтому в этом случае за среднеквадратичное значение берется амплитуда основной гармоники спектра, которая меньше амплитуды импульса в $2^{1/2}/\pi$ раза, т.е. $V_p/V_s = 2^{1/2}/\pi = 0,45$. Следует отметить, что рассмотрение импульсной модуляции вообще и прямоугольной, в частности, вызвано необходимостью использования динамического режима работы ППИК, наиболее просто реализуемого при рассматриваемой форме модуляции.

С учетом сказанного на основе (1) уравнение (2) можно записать в несколько ином виде:

$$R^2 = \frac{0,45J'\pi D_0 (NA)D\alpha_a \alpha_0}{2(\beta\Delta f)^{1/2} V_s/V_n}, \quad (3)$$

или

$$(a + b\Delta)^2 = \frac{0,45J'\pi D_0 (NA)D_1\alpha_a \alpha_0}{2(\beta\Delta f)^{1/2} V_s/V_n}. \quad (4)$$

Извлекая корень из обеих частей (4), получим

$$a + b\Delta = \left[\frac{0,45J'\pi D_0 (NA)D_1\alpha_a \alpha_0}{2(\beta\Delta f)^{1/2} V_s/V_n} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

откуда следует, что линейный размер $a+b\Delta$ обратно пропорционален корню квадратному из максимальной амплитуды импульса выходного напряжения ППИК, для получения которого на выходе ППИК, очевидно, следует включить корнеизвлекающее устройство. Поэтому, обозначив выходное напряжение указанного устройства через V_s' , можно записать

$$a + b\Delta = K/V_s' = (k/k_{SQ})/V_s', \quad (6)$$

где K – постоянный коэффициент, определяемый отношением k/k_{SQ} ; k – выражение, стоящее в квадратных скобках в (5) без V_s , а k_{SQ} – коэффициент преобразования V_s в выходное напряжение V_s' корнеизвлекаателя, т. е. $V_s' = k_{SQ}(V_s)^{1/2}$.

Легко заметить, что коэффициенты обратного (6) и прямого преобразования $V_s' = K/(a+b\Delta)$ одинаковы, вследствие чего значительно упрощается анализ влияния составляющих этих коэффициентов на погрешности измерения. Кроме того, из (6) также следует, что напряжение V_s' содержит информацию о постоянном линейном размере a и собственно воздушном зазоре Δ , распределенном случайным образом вдоль расточки статора. Поскольку $\Delta > 0$ и изменяется в пределах от Δ_{\min} до Δ_{\max} , т.е. $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$, то крайние значения этого предела определяют соответственно $V_s'^{\max}$ и $V_s'^{\min}$, промежуточные значения которых будут соответствовать колебаниям промежуточных значений Δ . Если длину расточки принять за линейную координату, пропорциональную времени при постоянной скорости вращения ротора, то очевидно, что случайное распределение зазора вдоль пространственной координаты (длины расточки) можно заменить его случайным распределением во времени, имеющим циклический характер с периодом, равным периоду вращения ротора.

Что касается влияния температур нагрева различных точек внутренней поверхности статора, эквивалентных действию источников изменяющейся во времени силы света J , на результаты измерения воздушного зазора с помощью модулируемой и неизменной по значению J , то оно полностью будет исключено благодаря фильтрации излучения с J , поскольку излучение J реализуется в области с $\lambda_J > \lambda_{J\sim}$. Таким образом, установив две такие системы (одну на роторе, а другую на статоре), можно относительно просто осуществить измерение как неподвижной, так и

подвижной асимметрий воздушного зазора с обеспечением всех необходимых требований, предъявляемых к указанным системам контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обнаружение дефектов гидрогенераторов / Под ред. Л.Г. Мамиконянца и Ю.М. Элькинда. – М. : Энергоиздат, 1985.- 224 с.
2. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М. : Мир, 1972. - 534 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 26. 10.1999.

Գ. Վ. ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ

ՀՉՈՐ ՀԻՊԵՐՈՒՏԵԼԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՕԴԱՅԻՆ ԲԱՅԱԿԻ ՈՉ ՀԱՄԱՉԱՓՈՒԹՅԱՆ ՀՄԿՄԱՆ ՄԻ ՄԵԹՈՂԻ ՄԱՍԻՆ

Հգոր հիդրոգեներատորների օդային բացակի բաշխման աղավաղումները կարող են առաջացնել նրա մագնիսական դաշտի զգալի անհամաչափություն, ինչը բազմաթիվ անցանկալի հետևանքների պատճառ է դառնում: Այդ նպատակով անհրաժեշտ է լինում հսկել նշված աղավաղումները՝ հնարավոր բացասական հետևանքները զարգացման վաղ փուլում կանխելու համար: Կատարված վերլուծությունն առնչվում է շոշափված խնդրի լուծման ժամանակակից մեթոդներից մեկի իրագործմանը, որը, ըստ նախնական գնահատականների, աչքի է ընկնում ներկայացվող պահանջների բավարարման կատարելությամբ:

G.V. BERBERYAN

ON AN ASYMMETRY CONTROL METHOD OF HIGH-POWER HYDROGENERATOR AIR-GAP

Air-gap control systems being used at present have a number of disadvantages and therefore do not completely meet the requirements. An attempt has been made to create a new method based on propagation and reflection process of IR radiation permitting to solve the present problem in all its aspects.