

ВЕКТОРНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ

ВЕЙНГЕР А. М., МЕДВЕДЕВ В. Н.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Для оценки искажения напряжений и токов в настоящее время используется коэффициент гармонического искажения (THD – Total Harmonic Distortion). Показатель характеризует содержание высших гармоник в напряжении или токе. При этом предполагается, что напряжение (или ток) является периодическим процессом. Коэффициент определяется Международным Стандартом [1] и Российским Стандартом [2] следующим образом (для напряжения):

$$K_{UH} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{U_h}{U_1} \right)^2}.$$

где: h – порядок гармоники, U_h – действующее значение гармоники тока порядка h , U_1 – действующее значение основной гармоники тока, H – порядок наивысшей учитываемой гармоники. Этот порядок устанавливается таким образом: $H = 40$ по отечественному Стандарту и $H = 50$ по Международному Стандарту.

Кроме этого, в качестве показателей искажения Стандартами вводятся коэффициенты отдельных гармоник $K_{Uh} = U_h/U_1$.

Нарушение симметрии трехфазной системы учитывается отдельно посредством составляющей напряжения обратной последовательности U_2 .

Стандартами для систем электроснабжения устанавливаются нормально допустимые и предельно допустимые значения показателей искажения и нарушения симметрии в точках общего присоединения.

Однако, напряжения и токи в современных электротехнических комплексах, в особенности, в комплексах, содержащих мощные регулируемые электроприводы переменного тока, строго говоря, не являются периодическими процессами. Это обусловлено несколькими причинами:

1. Частота энергосистемы претерпевает изменения.
2. Мгновенная угловая частота (мгновенная угловая скорость изображающего вектора напряжений) не является постоянной в узлах нагрузки, от которых питаются электроприёмники с быстроизменяющейся активной мощностью.
3. Токи, потребляемые от сети мощными регулируемыми электроприводами переменного тока и некоторыми другими электроприёмниками, содержат

составляющие, частота которых не кратна частоте основной гармоники, так называемые интергармоники [3]. Соответственно, такие составляющие имеют место и в напряжениях узлов нагрузки.

В качестве примера на рис. 1 показана часть спектра напряжения в узле нагрузки, от которого питается мощный регулируемый электропривод переменного тока на основе инвертора тока с ШИМ.

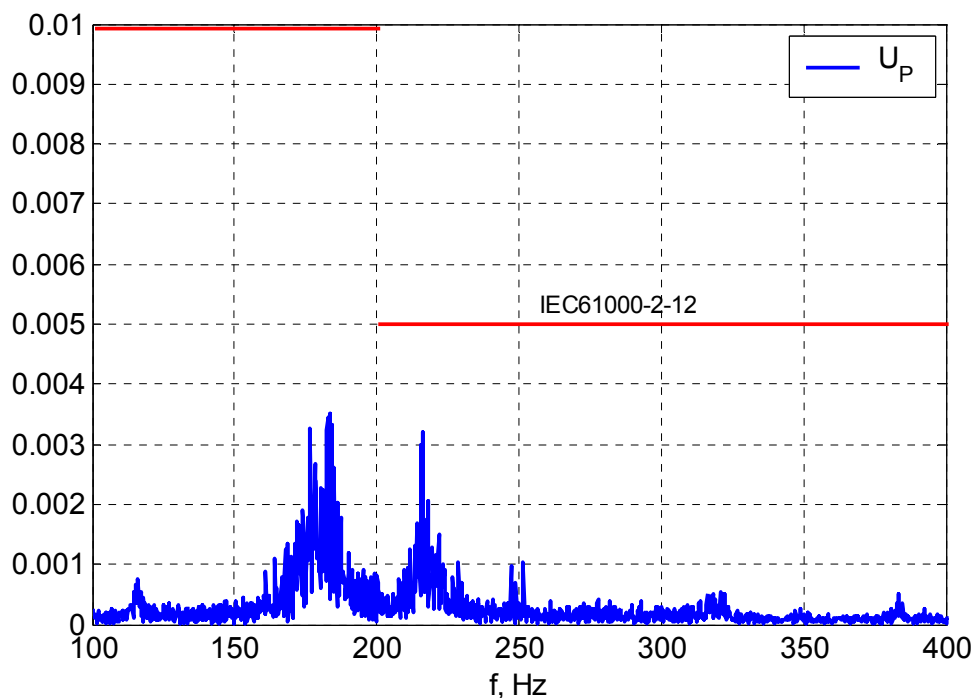


Рис. 1. Пример части спектра напряжения в точке общего присоединения

По вертикальной оси отложены относительные амплитуды компонент напряжения U_p для частот f . В диапазоне частоты $f = 150-250$ Hz имеют место достаточно заметные амплитуды интергармоник. Фактически в этом диапазоне наблюдается сплошной спектр, характерный для непериодического процесса. Что касается канонических гармоник с частотами 250 Hz и 350 Hz, то их амплитуды в данном случае совершенно незначительны. Использование существующего показателя искажения – коэффициента K_{UH} приводит к совершенно неоправданному выводу о чрезвычайно низком искажении напряжения.

Международный Стандарт, в рекомендательной части, определённым образом учитывает эту ситуацию: рекомендованы ограничения для коэффициентов интергармоник. В диаграмме на рис. 1 показаны эти ограничения. Кроме того, вводится дополнительный показатель искажения – общее содержание искажающих компонент (TDC – Total Distortion Content); для напряжения он определяется следующим образом:

$$U_{TDC} = \sqrt{U^2 - U_1^2}.$$

К сожалению, структура этого показателя такова, что малая погрешность измерения действующего значения основной гармоники приводит к чрезвычайно значительной

погрешности измерения показателя искажения. Между тем, в реальных процессах невозможно однозначно выделить основную гармонику.

Недостатком является также отсутствие единого показателя искажения. Высшие гармоники, интергармоники, нарушение симметрии трехфазной системы оказывают, по существу, однотипные изменения режима в основных видах электроприёмников: в электродвигателях – увеличенные пульсации момента и дополнительный нагрев, в управляемых и неуправляемых выпрямителях – дополнительные пульсации выпрямленного напряжения. Единый показатель искажения особенно важен, например, при оценке реакции регулируемого электропривода на возмущения, в особенности, на возмущения в питающей сети.

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Определить векторный показатель искажения напряжений и токов, в значительной мере свободный от указанных недостатков существующих показателей.
2. Рассмотреть методы измерения векторного показателя искажения.
3. Привести результаты измерения векторного искажения токов статора в регулируемом асинхронном электроприводе на основе инвертора тока с ШИМ.

ВЕКТОРНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ИСКАЖЕНИЯ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ

Общее определение

Рассматриваются трехфазная система линейных напряжений или трехфазная система токов, последняя – в отсутствии нейтрального провода. Система напряжений может быть охарактеризована изображающим вектором $\mathbf{u}_{\alpha\beta}$, система токов, например, токов статора электродвигателя, может быть охарактеризована изображающим вектором $\mathbf{i}_{s\alpha\beta}$.

Изображающий вектор, например вектор тока статора $\mathbf{i}_{s\alpha\beta}$, может быть преобразован к определённой вращающейся системе координат. В этой системе координат, в установившемся режиме электропривода и при неискажённых токах, преобразованный вектор тока \mathbf{i}_s является неизменным по аргументу и по модулю.

Для тока статора асинхронного двигателя может использоваться, например, система координат, связанная с вектором магнитного потока ротора. Для тока \mathbf{i}_T , потребляемого от сети, - система координат, связанная с вектором эквивалентного источника ЭДС сети.

Для анализа качества питающего напряжения (или тока) предлагается использовать в качестве показателя искажения среднеквадратичное отклонение изображающего вектора от его некоторым образом усредняемого значения. Для тока статора этот показатель выражается следующим образом:

$$I_{sD} = \sqrt{\frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} |\mathbf{i}_s(t) - \mathbf{i}_{s.av}(t)|^2 dt}.$$

Здесь T_M – время измерения. Усредняемый вектор $\mathbf{i}_{s.av}(t)$ рассматривается также как функция времени.

Рассматриваемые трехфазные системы представляют собой частные случаи многомерных систем. Среднеквадратичное отклонение вектора широко используется в качестве критерия качества в многомерных автоматических системах. Достаточно естественно использование такого критерия и в данном частном случае.

Системы координат

В отношении системы координат возможны различные варианты в зависимости от метода измерения и аппаратуры, которые будут рассмотрены ниже.

Усредняемый вектор

Определение среднего вектора измеряемого параметра простым усреднением, например вектора тока статора \mathbf{i}_s , за весь интервал измерения T_M приводило бы к неоправданному завышению показателя искажения I_{sD} . На величину показателя оказывают влияние, например, медленные изменения частоты. Поэтому, как уже указано, усредняемый вектор $\mathbf{i}_{s.av}(t)$ рассматривается как функция времени и может определяться различными способами.

Использование среднего значения вектора за период

В этом варианте усреднённый вектор вычисляется на каждом периоде. Период отсчитывается по углу поворота используемой системы координат относительно неподвижных осей.

Использование фильтрованного вектора

Другой вариант определения усредненного вектора – использование фильтра, при этом $\mathbf{i}_{s.av}(t)$ формируется по соотношению:

$$\mathbf{i}_{s.av}(t) = \frac{1}{1 + T_F p} \mathbf{i}_s(t).$$

Постоянная времени фильтра T_F также является одним из параметров измерения показателя искажения.

Методы измерения показателя искажения

Использование специального измерительного прибора или компьютера с аналоговыми входами в качестве измерительного прибора

Измеряются фазные токи статора i_{sA} , i_{sC} . В алгоритме прибора путём математической обработки может быть получен вектор $\mathbf{i}_{s\alpha\beta}$ в координатах статора. Затем математически

имитируется локальная следящая система (Phase Locked Loop – PLL) с определённой полосой пропускания Ω_{PS} . Эта полоса пропускания – также один из параметров измерения. Полоса пропускания выбирается таким образом, чтобы угловая скорость системы координат ω_{cM} следовала медленным изменениям физической угловой скорости ω_c вектора $\mathbf{i}_{s\alpha\beta}$, но, вместе с тем, фильтровались отклонения скорости, вызванные искажением токов. Аналогично системе координат для статора решается задача для токов, потребляемых от сети.

Измерение по зарегистрированным процессам фазных токов

Указанные выше операции могут быть выполнены путём математической обработки зарегистрированных процессов фазных токов.

Измерение при виртуальных испытаниях электропривода

В этом случае процессы исследуются на виртуальном стенде, содержащем реальное устройство управления и компьютерную модель силовой части электропривода, работающую в реальном времени. В компьютерной модели уже имеется система координат, связанная с вектором потока ротора. Возможно использовать эту систему координат, либо связать с ней более инерционную систему посредством PLL. Имеется в компьютерной модели также система координат, связанная с вектором ЭДС сети.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕКТОРНОГО ИСКАЖЕНИЯ ТОКОВ СТАТОРА В РЕГУЛИРУЕМОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Исследуемый электропривод

В качестве объекта исследования был использован регулируемый асинхронный электропривод насоса, в состав которого входят: асинхронный двигатель и преобразовательно-регулирующее устройство (ПРУ) PowerFlex 7000 на основе инвертора тока с ШИМ компании Rockwell Automation. Функциональная схема представлена на рис. 2.

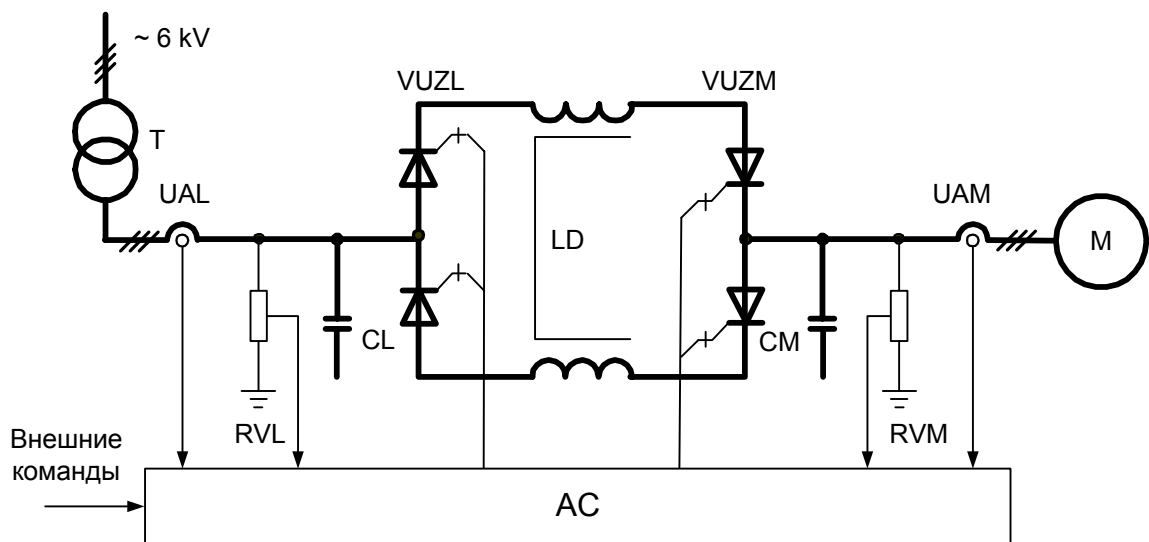


Рис. 2. Функциональная схема исследуемого электропривода

В состав ПРУ входят: мостовые преобразователи $VUZL$, $VUZM$ на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, конденсаторные батареи фильтров CL , CM , сглаживающий реактор выпрямленного тока LD , трансформатор T , устройство управления AC , а также элементы обратной связи по токам и напряжениям. Преобразователь $VUZL$ преобразует входное напряжение в регулируемый выпрямленный ток; преобразователь $VUZM$ преобразует выпрямленный ток в двуполярные пакеты импульсов; высокочастотные составляющие этих пакетов фильтруются конденсаторной батареей CM . Входные токи преобразователя $VUZL$ также представляют собой двуполярные пакеты импульсов; высокочастотные составляющие фильтруются батареей CL .

Номинальные данные двигателя: 1.6 МВт, 992 об/мин, 6 кВ, 50 Гц. Номинальные данные ПРУ соответствуют указанному двигателю

Методика исследования

Измерения выполнены на виртуальном стенде высоковольтного электропривода. Функциональная схема стенда представлена на рис. 3.

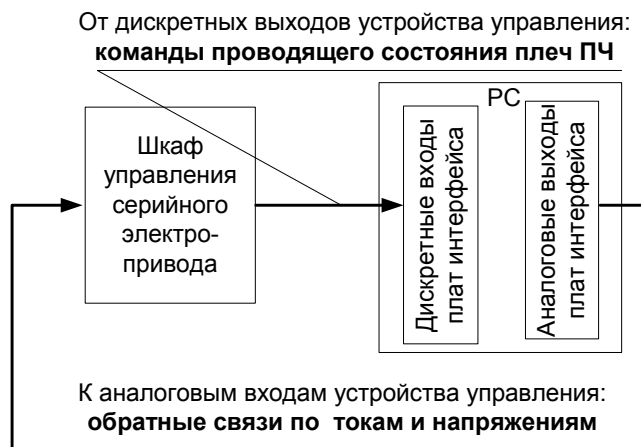


Рис. 3. Функциональная схема виртуального стенда

В состав стенда входит шкаф управления серийного электропривода PowerFlex 7000 и компьютерная модель силовой части электропривода: модели механизма, двигателя, силовой части преобразователя, питающей сети. Компьютерная модель работает в реальном времени и соединена со шкафом управления. Соответствие процессов стенда процессам реальных электроприводов многократно проверено.

Модель функционирует иерархически, с двумя разными циклами вычислений. Механические процессы моделируются с циклом вычислений $T_{s1} = 80$ мкс; с этим же временем цикла работают аналоговые выходы модели. Электромагнитные процессы моделируются с временем цикла $T_{s0} = 40$ мкс.

В данном исследовании модель измерения векторного искажения включена в состав компьютерной модели. Она соответствует описанному методу измерения при виртуальных испытаниях. В этой модели функционируют системы координат с направляющими векторами $\mathbf{1}_s, \mathbf{1}_T$, соответственно для стороны двигателя и для стороны сети. Формируются модули отклонения векторов:

$$i_{sD0}(t) = |\mathbf{i}_s(t) - \mathbf{i}_{s.av}(t)|, i_{TD0}(t) = |\mathbf{i}_T(t) - \mathbf{i}_{T.av}(t)|,$$

соответственно для тока статора и тока трансформатора.

Усредняемые векторы $\mathbf{i}_{s.av}(t), \mathbf{i}_{T.av}(t)$ формируются двумя рассмотренными ранее методами:

1. Усреднением на каждом периоде.
2. Фильтрацией вектора.

Регистрация отклонений векторов осуществляется посредством регистрирующего осциллографа. Принято число точек регистрации $M = 50\,000$. Измерения выполнялись с временами измерения:

1. $T_{M1} = 5$ с.
2. $T_{M2} = 50$ с.

Время выборки осциллографа составляет соответственно $T_{R1} = 100$ мкс и $T_{R1} = 1$ мс. Это – довольно существенные времена при частоте процесса 50 Гц. Для того, чтобы оценить влияние времени выборки, измерения выполнялись двумя методами:

1. Непосредственно регистрируются процессы $i_{sD0}(t), i_{TD0}(t)$.
2. На каждом периоде вычисляется среднеквадратичное отклонение вектора:

$$i_{sD}(t_1 + T_{ss1}) = \sqrt{\frac{1}{T_{ss1}} \int_{t_1}^{t_1 + T_{ss1}} i_{sD0}^2 dt}.$$

Это значение удерживается на аналоговом выходе модели в течение следующего периода. Период T_{ss1} отсчитывается по углу поворота направляющего вектора $\mathbf{1}_s$ системы координат. При этом на выходе сформирована кусочно-постоянная функция $i_{sD}(t)$.

Аналогично формируется кусочно-постоянная функция $i_{TD}(t)$.

Помимо векторного искажения токов, измерялось также среднеквадратичное отклонение момента ΔM_{RMS} .

Основные результаты

Пример установившегося режима

Осциллограмма представлена на рис. 4. Она соответствует режиму со значениями скорости и момента, близкими к номинальным значениям.

Зарегистрированы следующие переменные: i_D – выпрямленный ток, i_{FsA} – гладкая составляющая фазного тока статора (проекция вектора $\mathbf{i}_{s,av}(t)$ на ось фазы A), i_{sA} – фазный ток статора, M – электромагнитный момент двигателя. Все переменные представлены как относительные величины при общепринятом выборе базовых значений электрической машины.

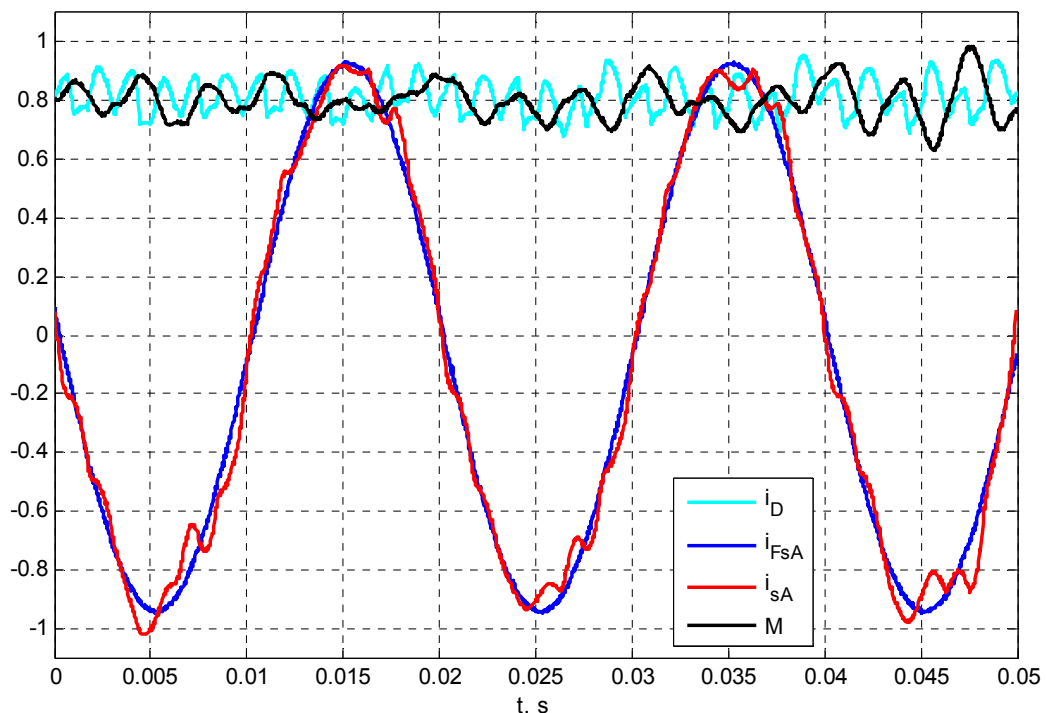


Рис. 4. Осциллограмма установившегося режима

Как видно из рисунка, искажение тока статора не столь существенно, но осциллограмма наглядно демонстрирует неперiodичность тока.

Измерение векторного искажения

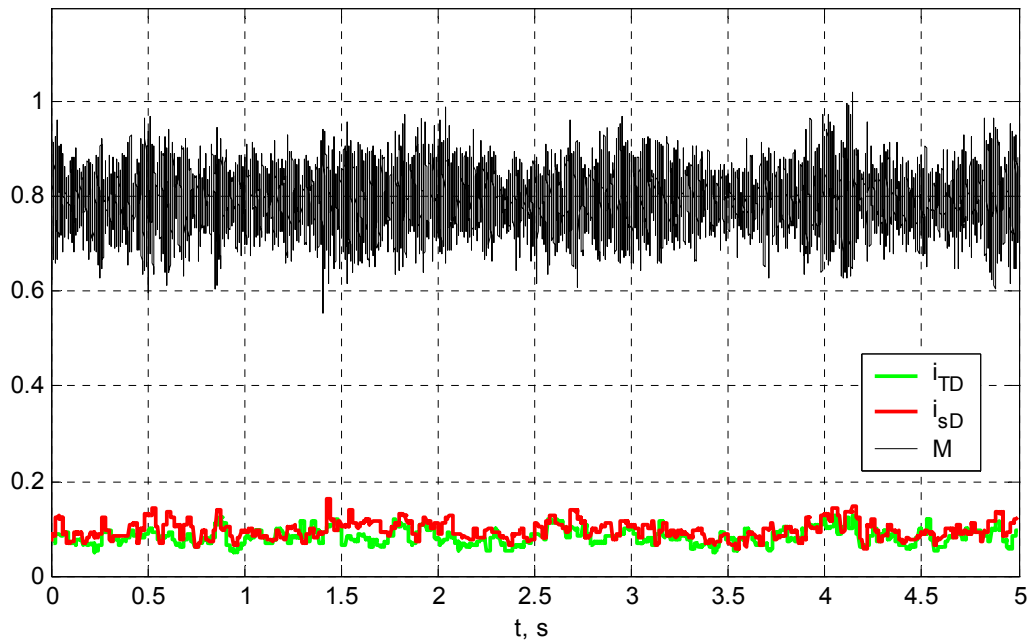


Рис. 5, Векторные искажения токов и электромагнитный момент

На осциллограмме (рис. 5) представлены кусочно-постоянные функции векторного искажения тока от сети i_{TD} , тока статора i_{sD} . Представлен также электромагнитный момент M .

Векторное искажение претерпевает значительные изменения от периода к периоду, что также подтверждает неперIODичность процессов.

Результаты измерений и их сопоставление

Результаты измерений при двух разных способах усреднения вектора и двух разных временах измерения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения при двух методах усреднения вектора и двух значениях времени измерения

Метод усреднения вектора	ΔM_{RMS}		I_{TD}		I_{sD}	
	$T_M = 5 \text{ s}$	$T_M = 50 \text{ s}$	$T_M = 5 \text{ s}$	$T_M = 50 \text{ s}$	$T_M = 5 \text{ s}$	$T_M = 50 \text{ s}$
Фильтрация вектора, $T_F = 1 \text{ s}$	0.061	0.063	0.084	0.085	0.098	0.107
Усреднение вектора за период			0.088	0.086	0.110	0.106

Как видно из таблицы, все результаты соответственных измерений достаточно близки, поэтому возможно ограничиваться временем измерения $T_M = 5 \text{ s}$.

В табл. 2 сопоставляются результаты измерения при двух разных методах регистрации: регистрации кусочно-постоянных функций $i_{TD}(t)$, $i_{sD}(t)$, (векторных искажений на каждом периоде) и непосредственной регистрации модуля векторного отклонения для тока от сети статора $i_{TD0}(t)$ и тока статора $i_{sD0}(t)$.

Таблица 2

Результаты измерения при двух методах регистрации

Метод регистрации	I_{TD}	I_{sD}
Регистрация кусочно-постоянных функций $i_{TD}(t)$, $i_{sD}(t)$	0.088	0.103
Непосредственная регистрация функций $i_{TD0}(t)$, $i_{sD0}(t)$	0.089	0.104

Сравнение результатов измерения векторного искажения и искажения фазного тока

Векторный показатель искажения I_{sD} сравнивался со среднеквадратичным значением всех искажающих компонент фазного тока $I_{sA.TDC}$:

$$I_{sA.TDC} = \sqrt{I_{sA.RMS}^2 - I_{sA1.RMS}^2}$$

В этой формуле $I_{sA.RMS}$ – среднеквадратичное значение тока за время измерения, $I_{sA1.RMS}$ – среднеквадратичное значение основной гармоники тока.

Оказалось, что выполняется приближённое соотношение:

$$I_{sD} \approx \sqrt{2} I_{sA.TDC}$$

Оно выполняется с незначительным превышением векторного показателя I_{sD} . Такое соотношение соответствует случаю, когда искажения компонент $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ являются независимыми случайными процессами с совпадающими среднеквадратичными значениями.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕКТОРНОГО ИСКАЖЕНИЯ ТОКОВ СТАТОРА В РЕГУЛИРУЕМОМ СИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Измерение выполнено после ввода в эксплуатацию регулируемого синхронного электропривода шахтного вентилятора 3150 кВт, 500 об/мин, 6 кВ, 50 Гц. Функциональная схема электропривода отличается от представленной на рис. 2 только видом преобразователя на стороне сети: в данном электроприводе используется 18-пульсный тиристорный выпрямитель-инвертор. Зарегистрирована осциллограмма фазных токов i_{sA} , i_{sC} при частоте вращения 300 об/мин. Осциллограмма обработана по описанной выше методике, с использованием фильтрованного вектора тока \mathbf{i}_{Fs} во

вращающейся системе координат. Время измерения: $T_M = 5$ с; постоянная времени фильтра: $T_F = 1$ с.

На рис. 6 представлен один из интервалов процесса. Используются прежние обозначения переменных; дополнительно обозначено мгновенное значение векторного отклонения $\Delta \mathbf{i}_s = \mathbf{i}_s - \mathbf{i}_{Fs}$.

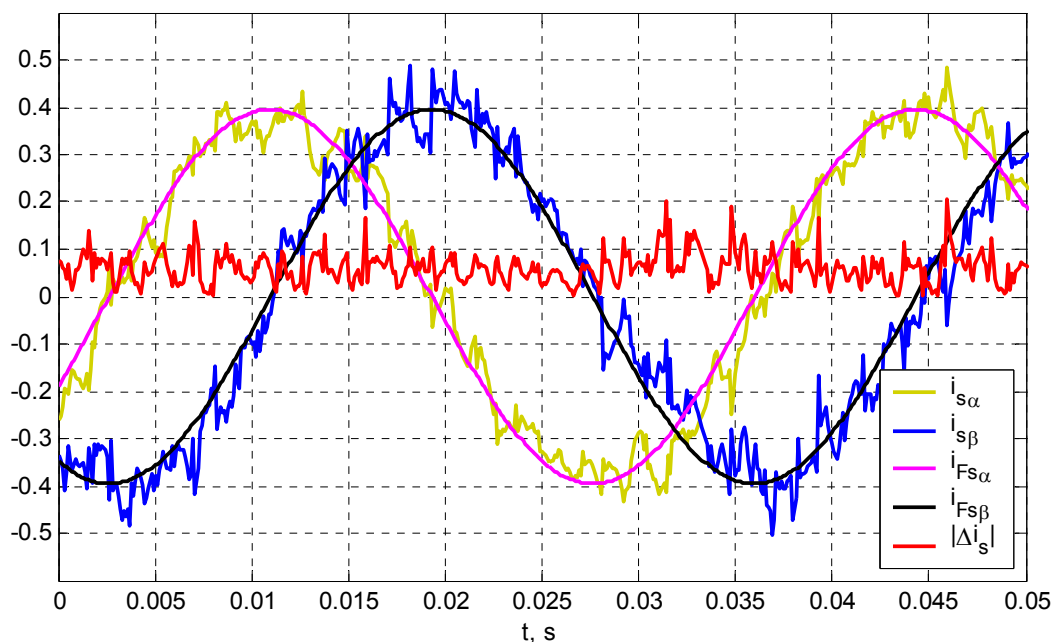


Рис. 6

Векторный показатель искажения вектора тока статора составляет $I_{SD} = 0.061$.

ВЫВОДЫ

1. Векторный показатель учитывает высшие гармоники, интергармоники, составляющую тока обратной последовательности. Все эти составляющие, например, для статора электродвигателя, действуют в одном направлении: они увеличивают пульсации момента и нагрев. В этом отношении векторный показатель более полезен, чем существующие показатели отклонений режима.

2. Векторный показатель имеет явные преимущества в современных системах регулируемого электропривода переменного тока, где роль канонических гармоник в общем искажении сравнительно невелика.

3. Векторный показатель позволяет однозначно оценивать иммунитет регулируемого электропривода переменного тока по отношению к возмущениям в питающей сети.

4. Векторный показатель искажения может быть измерен при существующих аппаратных и программных средствах.

5. Рассмотренные методы и параметры измерения векторного показателя приводят к весьма близким результатам.

ЛИТЕРАТУРА

[1] International Standard IEC 61000-2-12. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part -12-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems.- 2003.04.

[2] Межгосударственный Стандарт ГОСТ 13109-1997. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.- Переиздание, январь 2002.

[3] International Standard IEC 61000-2-1. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems. – 1990.05.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Вейнгер Александр Меерович,
121002, Москва, пер. Староконюшенный, 5/14-3,
тел. раб. (495) 956-04-64,
доктор техн. наук, профессор, автор и соавтор 4 книг,
более 190 опубликованных статей и докладов, более 60
изобретений в области автоматизированного
электропривода и смежных областях; в настоящее время –
консультант по мощным электроприводам, регион EMEA,
компания Rockwell Automation.



Медведев Владимир Николаевич,
428034, Чебоксары, б-р Юности 9-21,
тел. раб. (499) 613-57-81
ООО «Центртехкомплект» г.Москва, начальник отдела
научно-технического развития.
Окончил факультет электрификации и автоматизации
промышленности Чувашского государственного
университета в 1992 году, автор и соавтор 2 статей и
одного изобретения в области автоматизированного
электропривода.