

Заключение

Матричные преобразователи являются отдельным классом современных силовых электронных устройств, сочетающим в себе свойства всех остальных преобразователей переменного тока. За последние годы разработана обширная теоретическая база различных алгоритмов управления МПЧ, приспособленных для работы в составе электроприводов и систем электропитания различного назначения. Однако возможное широкое промышленное применение МПЧ на данный момент ограничивается их характерными недостатками и рядом технологических трудностей.

Библиографические ссылки

1. Климов В., Климova С. Двухнаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока // Силовая электроника. – 2008. – № 4. – С. 58–61.
2. Сидоров С. Матричный преобразователь частоты – объект скалярного управления // Силовая электроника. – 2009. – № 3. – С. 31–35.

3. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. Преобразовательная техника : учеб. пособие. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – 424 с.

4. Кокорин Н. В. Исследование и разработка преобразователя частоты матричного типа для электроприводов переменного тока : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.12 : утв. 11.05.2010. – Чебоксары, 2010. – 157 с.

5. Alesina, A.; Venturini, M. Intrinsic amplitude limits and optimum design of 9-switches direct PWM AC-AC converters // Proceedings of IEEE power electronics specialists conference, PESC'88, Kyoto, Japan. – 1988. – Vol. 2. – Pp. 1284-1291.

6. Karaca, H.; Akkaya, R. Control of Venturini Method Based Matrix Converter in Input Voltage Variations // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009. Vol II IMECS 2009, March 18-20, 2009, Hong Kong. – URL: http://www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009_pp1412-1416.pdf (дата обращения: 14.11.2013).

A. V. Morozov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. K. Barsukov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. A. Morozov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Development of matrix converter

The theoretical foundations of matrix converter functioning are presented in the article, an algorithm of driving the power switches providing the regulation of frequency and amplitude of the output voltage and input power factor is described.

Keywords: inverter, bidirectional power switch, scalar control, FPGA

Получено: 08.11.2013

13.32.018.782.3-047.37

А. И. Судаков, кандидат технических наук, доцент;

Е. А. Чабанов, доцент;

Н. В. Шулаков, доктор технических наук, профессор

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИНХРОННЫХ МАШИН В ОПЫТАХ ВНЕЗАПНОГО СИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Статья посвящена новому развитию вероятностно-статистических методов (ВСМ) исследования длительных переходных процессов синхронных машин (СМ), протекающих в условиях влияния на данные процессы различных случайных факторов. В частности, разработан новый, неординарный метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения дискретной статистической модели переходной составляющей к опытным данным сравнительно длинного участка дискретного переходного процесса и представления указанной погрешности в виде дискретной поверхности в трехмерном измерении.

Ключевые слова: синхронная машина, переходный процесс, идентификация, среднеквадратичная погрешность

Научный коллектив Пермского национального исследовательского политехнического университета в составе проф. Н. В. Шулакова (руководитель проекта), доц. А. И. Судакова, доц. Е. А. Чабанова, ст. преподавателя С. В. Шутемова в рамках выигранного гранта № 13-08-96044 ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» занимается разработкой новых подходов к методам идентифи-

кации переходных процессов мощных синхронных машин в объеме требований стандартов Российской Федерации по результатам стендовых испытаний.

1. Актуальность задачи

Искусственное нарушение нормального режима работы синхронных генераторов в опыте внезапного симметричного короткого замыкания (ВКЗ) всех фаз

при заводских стендовых испытаниях на предприятиях отрасли электромашиностроения является одним из основных для получения широкого спектра электромагнитных параметров мощных СМ. Точность и достоверность идентификации переходного процесса в данном опыте методами отечественных стандартов на испытания СМ до настоящего времени не обеспечивается в полной мере из-за значительного разброса постоянных времени (ПВ), начальных значений составляющих тока якоря, неточного использования установившегося значения тока якоря, влияния на протекающие процессы различных случайных факторов и других причин. Следствием этого является существенное отклонение параметров СМ x_d , x'_d , x''_d , ударного тока ВКЗ и ряда важнейших промежуточных величин, например, начального сдвига первой вершины ΔT , сдвига последующих 5–6 вершин при сильно выраженном сверхпереходном эффекте в переходном процессе, от их достоверных значений. Поэтому разработка точного и достоверного метода определения погрешности результатов идентификации переходного процесса в опыте ВКЗ СМ до настоящего времени остается актуальной.

Поставленная цель достоверной идентификации переходных процессов достигнута путем использования процедуры оптимизации с одновременным варьированием установившегося значения тока якоря и нижней границы переходной составляющей на участке процесса, протекающего в условиях влияния различных случайных факторов.

2. Испытательное оборудование и программное обеспечение

Первичная информация для идентификации по результатам стендовых испытаний синхронного генератора (СГ) типа ТТК-50-2УЗ-П мощностью 50 МВт получена при периодических испытаниях по отечественным стандартам из опытов ВКЗ с использованием штатных измерительных промышленных трансформаторов и цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) корпорации LeCroy. Переходные процессы протекают при испытаниях в опытах ВКЗ в виде аналоговых затухающих синусоидальных электрических сигналов с частотой 50 Гц и записываются ЦЗО с частотой дискретизации 10 000 выборок за период. По результатам проведенных исследований в [1, 2] количество выборок было снижено на периоде до 200 с сохранением высокой точности выделения вершин переходных процессов. На рис. 1, а представлен дискретный переходный процесс длительностью 5 с, полученный в одной из фаз испытуемого генератора. На рис. 1, б показаны выделенные с шагом 0,02 сек. разнополярные вершины дискретного переходного процесса, являющиеся дискретно заданной исходной информацией. На рис. 1, в приведены дискретно заданные огибающие периодического

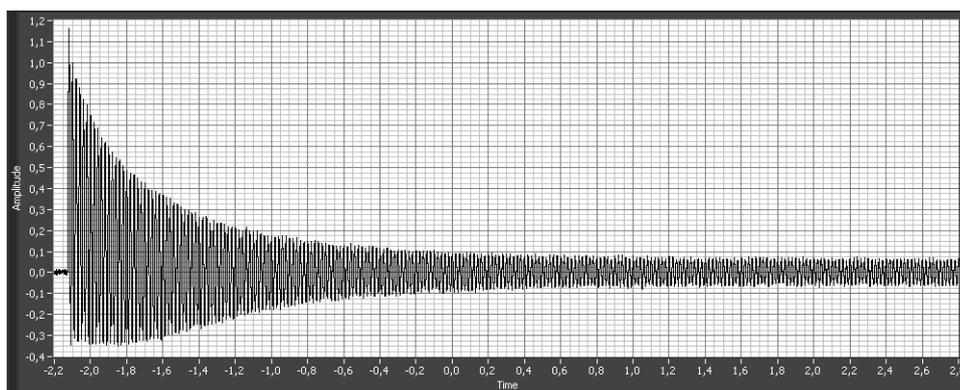
тока в виде значений между двумя его огибающими с шагом 0,01 сек. Дискретные огибающие получены в соответствии с аналитическими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} i_{oj} &= i_{ij} + |I_{mj}|, \quad j = 2, K - 3, \\ i_{ij} &= |0,375 \cdot I_{m(j-1)} + 0,75 \cdot I_{m(j+1)} - 0,125 \cdot I_{m(j+3)}|, \\ i_{i1} &= 1,875 \cdot I_{m2} - 1,25 \cdot I_{m4} + 0,375 \cdot I_{m6}, \end{aligned} \right\} (1)$$

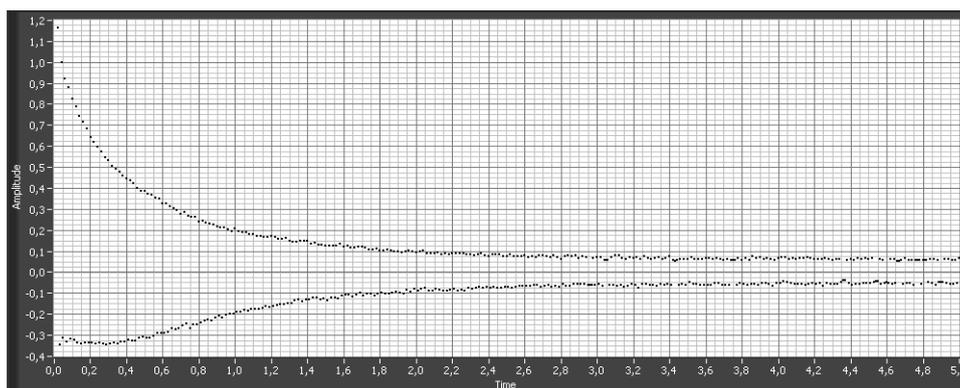
где 0,375; 0,75; 0,125 – коэффициенты, выведенные на базе интерполяционной схемы Эйткена, используются для расчета интерполяционных узлов i_{ij} по трем амплитудным значениям тока якоря I_{mj} между соседними вершинами, принадлежащими огибающим затухающего тока якоря; 1,875; 1,25; 0,375 – аналогично полученные коэффициенты для определения первого интерполяционного узла при интерполяции назад.

Рассчитанные по опытным вершинам интерполяционные величины тока складываются с модулями противоположных вершин тока якоря, образуя так называемые элементы дискретного периодического тока. Разработанный аналитический способ получения дискретно заданных значений огибающих тока переходных процессов в опыте ВКЗ СМ по (1) с частотой 100 Гц полностью исключает все трудоемкие графоаналитические операции, предлагаемые отечественными стандартами.

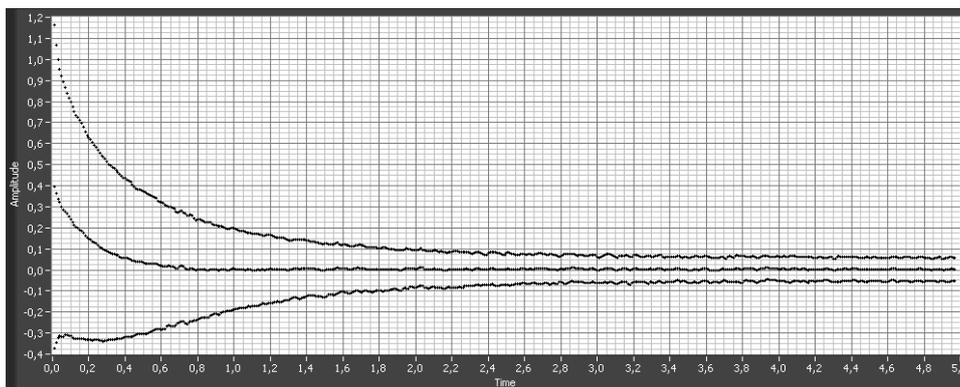
Разделение дискретных огибающих переходных процессов на составляющие с использованием аналитических способов в условиях зашумленности и влияния на переходные процессы случайных факторов и из-за многозначности конечных результатов не обеспечивает идентификацию с высокой точностью и необходимой достоверностью. На наш взгляд, этап разделения дискретных огибающих переходных процессов СМ на составляющие уже требует обязательного исследования степени зашумленности исходной первичной информации с использованием статистических методов, построенных на базе теории вероятностей и математической статистики (ТВ и МС). Поэтому дальнейшая идентификация переходных процессов СМ по отечественным стандартам, базирующаяся на трудоемких графоаналитических операциях с точечным результатом, практически непригодна для проведения глубоких исследований и идентификации переходных процессов. В связи с этим разработаны и продолжают совершенствоваться вероятностно-статистические методы (ВСМ) идентификации переходных процессов СМ, которые проходят апробацию по результатам промышленных стендовых испытаний в программно-инструментальной среде LabVIEW с привлечением электронных таблиц в Excel [3].



a



б



б

Рис. 1. Переходный процесс после цифрового преобразования первичной аналоговой информации в одной из фаз турбогенератора (ТТК-50-2У3-П) в опыте внезапного короткого замыкания при испытательном напряжении $0,1 \cdot U_{\text{ном}}$: а – первичная информация в цифровом виде дискретного переходного процесса; б – выделенные вершины переходного процесса; в – огибающие периодического тока с дискретно заданным аperiodическим током переходного процесса

3. Описание методики исследования и идентификации переходных процессов

Анализ результатов многочисленных исследований переходных процессов, причин и источников разброса результатов обработки методами отечественных стандартов однотипных процессов подтвердил правильный выбор базового случайного признака, а именно kj -й постоянной времени (ПВ) τ_{kj} . ПВ косвенно зависит от амплитудных значений синусоидальных составляющих переходных процессов СМ, затухающих по экспоненциальному закону. Поэтому в основе базового случайного признака лежит логариф-

мический декремент затухания синусоидальных процессов по экспоненциальному закону [1]:

$$\tau_{kj} = (t_j - t_k) / \ln |i_{ok} / i_{oj}|, \quad (2)$$

где i_{ok}, i_{oj} – элементы между огибающими в узлах дискретизации конкретной составляющей переходного процесса; t_k, t_j – нижняя и верхняя границы, соответствующие элементам i_{ok}, i_{oj} переходного процесса; $k = \overline{1, K}$ – изменение переменной при задании нижней границы; $j = \overline{k+1, K}$ – изменение пере-

менной для задания верхней границы; K – количество элементов i_{ok} между нижней и верхней границами.

Известно, что для теоретических (расчетных) переходных процессов τ_{kj} ПВ остается постоянной независимо от расположения элементов в переходном процессе, которые используются в формуле (2). В реальных переходных процессах τ_{kj} ПВ в условиях влияния случайных факторов сильно отклоняются от постоянства. Поэтому исследования переходных процессов начинаются с создания объема N генеральной совокупности случайного признака на базе точечной выборки τ_{kj} (2) объемом двух элементов, извлекаемых из K элементов, а также выборки n_b из нее на участке переходного процесса с одной составляющей. Для генеральной совокупности и ее выборки вычисляют их первые центральные моменты (математические ожидания (МО)) со вторыми центральными моментами (дисперсиями) с целью проверки близости полученных параметров:

$$N_K^n = K! / [n!(K - n)!], \tag{3}$$

где $K = (t_b - t_n) / \Delta t + 1$ – количество элементов, задаваемое в указанном диапазоне; Δt – шаг квантования или следования элементов в диапазоне $t_n - t_b$, равный 0,01 с; n – точечная выборка из двух элементов ($n = 2$);

$$N = \sum_{k=1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=2}^K \tau'_{kj} + \dots + \sum_{k=K-1}^K \tau'_{kj}, \tag{4}$$

$$\tilde{\tau}'_0 = \sum_1^N \tau'_{kj} / N, \sigma_0^2 = \sum_1^N (\tau'_{kj} - \tilde{\tau}'_0)^2 / N, \tag{5}$$

$$n_b = \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \dots, \tag{6}$$

$$\tilde{\tau}' = \sum_1^n \tau'_{kj} / n_b, \sigma_b^2 = \sum_1^n (\tau'_{kj} - \tilde{\tau}')^2 / n_b, \tag{7}$$

где $\tilde{\tau}'_0$, $\tilde{\tau}'$ – первые центральные моменты случайного признака генеральной совокупности N и выборки n_b из нее; σ_0^2 , σ_b^2 – вторые центральные моменты генеральной совокупности N и выборки n_b из нее.

При испытаниях СМ новых серий или впервые проходящих стендовые испытания в процессе освоения известных серий важным является подтверждение гипотезы нормального распределения случайного признака по выборке с использованием известной схемы в ТВ и МС – критерия согласия Пирсона «Хи-квадрат», что хорошо подтверждается результатами исследования.

Для проверки по формулам (4) – (7) близости полученных параметров вместо интервальных оценок классической теории вероятностей в работе [2] пред-

ложен новый инженерный подход с использованием *эффективных точечных выборок*:

$$\tau_{эф} = |t_{н.эф} - t_{в.эф}| / \ln |i_{о.н.эф} / i_{о.в.эф}|. \tag{8}$$

Их существование с минимальным отклонением от МО подтверждено аналитически в работе [2] при исследованиях генеральной совокупности случайного признака для отдельных составляющих переходных процессов (переходной или сверхпереходной).

В формуле (8) элементы между огибающими соответствующей составляющей для $i_{о.н.эф}$ в нижней границе $t_{н.эф}$ и $i_{о.в.эф}$ в верхней границе $t_{в.эф}$ жестко связаны выведенным коэффициентом 0,33. Этот коэффициент позволяет легко извлекать эффективные точечные выборки из любого объема генеральной совокупности случайного признака, созданного на основе опытных данных для любой отдельно исследуемой как переходной, так и сверхпереходной составляющих переходного процесса [1]:

$$i_{о.в.эф} = 0,33 \cdot i_{о.н.эф}. \tag{9}$$

Появление эффективных точечных выборок в объеме генеральной совокупности случайного признака с точки зрения теории вероятностей является редким событием (от единиц процентов до менее одного процента). В соответствии с распределением Пуассона для редких случайных событий, минимальный объем выборки эффективных точечных выборок (например, из 0,5 % существующих в объеме генеральной совокупности) может составлять около четырех штук. Вероятность появления в выборке из четырех эффективных ПВ одной непригодной составляет 0,02, а вероятность появления больше одной непригодной ПВ равна нулю. Сконструированные формулы, применяемые для расчета параметров переходной составляющей по четырем эффективным точечным ПВ с учетом первого и второго центральных моментов, имеют вид:

$$\tilde{\tau}'_{эф} = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1}^4 \tau'_{k_{эф}j_{эф}}, 2\tilde{U}'_{0эф} = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1}^4 u'_{ок_{эф}} \cdot e^{\frac{t_{к_{эф}} + \Delta T}{\tilde{\tau}'_{эф}}}, \tag{10}$$

$$MO = \tilde{\tau}'_{эф} = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1}^4 \tau'_{k_{эф}j_{эф}}, \sigma_{эф}^2 = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1}^4 (\tau'_{k_{эф}j_{эф}} - \tilde{\tau}'_{эф})^2, \tag{11}$$

где $j_{эф}$ – переменная при расчете $\tau'_{k_{эф}j_{эф}}$ -х ПВ определяется совместно с верхним элементом переходной составляющей по условию (9).

Таким образом, получение близости параметров генеральной совокупности случайного признака и выборки из него по (4)–(7) с учетом дополнительно полученных первого и второго центральных моментов по (11) гарантирует достоверность идентификации переходной составляющей для дальнейших исследований, которые связаны с минимизацией среднеквадратичной погрешности приближения ее модели к опытным данным.

Исследованиями установлено, что основными источниками систематической погрешности при обработке переходных процессов по результатам испытаний СМ в опытах ВКЗ является установившееся значение тока якоря. Уровень погрешности от случайных факторов в большей степени учитывается выбором нижней границы $t'_{н.эф}$ при исследовании переходной составляющей в опытах ВКЗ с использованием эффективных точечных выборок. Для учета влияния различных случайных факторов на переходные процессы впервые по результатам исследований разработан способ визуального представления среднеквадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}'$ в виде *дискретной поверхности в трехмерном измерении* [4]. Для этого среднеквадратичная погрешность приближения $\bar{\Delta}'$ на участке исследования переходной составляющей была представлена минимизируемой дискретно заданной статистической функцией с одновременным варьированием установившегося значения тока якоря и нижней границы $t'_{н.эф}$ на исследуемом участке переходной составляющей:

$$[\bar{\Delta}'_K]_{\min} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_1^K [(i_{ок})_{\text{мод}} - (i_{ок})_{\text{оп}}]^2}, \quad (12)$$

где $(i'_{ок})_{\text{мод}} = 2I'_{0эф} \cdot e^{-(t'_{н.эф})_{\text{опт}}/T'_{эф}} + (2i_{\infty})_{\text{опт}}$ – математическая модель дискретно заданного элемента переходной составляющей, получаемая на базе эффективных точечных выборок в процессе оптимизации установившегося значения тока якоря одновременно с нижней границей $t'_{н.эф}$; $(i_{ок})_{\text{оп}}$ – дискретные элементы переходной составляющей, полученные по опытным данным в соответствии с (1).

Разработанный способ минимизации по (12) среднеквадратичной погрешности приближения с процедурами оптимизации и программирования на каждом шаге реализован алгоритмически. При варьировании с заданным шагом установившегося значения тока якоря от первоначально заданной нижней границы $t'_{н.эф}$ сначала определяют параметры переходной составляющей по (10), затем ее моделируют и рассчитывают величину погрешности приближения $\bar{\Delta}'$ по (12). Указанные процедуры автоматически повторяются в процессе вариаций установившегося значения тока якоря с неизменной нижней границей $t'_{н.эф}$. В итоге в трехмерной системе координат реализуется дискретно заданная кривая изменения погрешности $\bar{\Delta}'$ в виде параболы с минимальным уровнем погрешности. На следующем шаге с неизменным значением нижней границы $(t'_{н.эф} + \Delta t)$ варьированием установившегося значения тока якоря с повторением указанных процедур реализуется вторая дискретно заданная парабола со своим миниму-

мом погрешности $\bar{\Delta}'$ и т. д. После завершения варьирования нижней границы $t'_{н.эф}$ и всех сопутствующих ей процедур получают поверхность в виде дискретно рассчитанных кривых-парабол, реализующих статистическую функцию (12). В зависимости от вариации величины шага изменения нижней границы $t'_{н.эф}$ поверхность погрешности выглядит сплошной или разряженной в виде набора дискретно заданных парабол.

Процесс минимизации среднеквадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}'$ по выражению (12) на участке исследования переходной составляющей завершается автоматической выдачей результатов идентификации переходной составляющей и графической информации.

Идентификация остальных составляющих переходного процесса в опытах ВКЗ (сверхпереходной, аperiodической) осуществляется аналогично переходной составляющей с конструированием более простых формул для определения постоянных времени и начальных значений с использованием эффективных точечных выборок.

В качестве дискретно заданных элементов для идентификации сверхпереходной составляющей с учетом (8) принимаются разности между элементами переходного процесса по (1) и величинами $(i'_{ок})_{\text{мод}} = 2I'_{0эф} \cdot e^{-(t'_{н.эф})_{\text{опт}}/T'_{эф}} + (2i_{\infty})_{\text{опт}}$, смоделированными по результатам оптимизации переходной составляющей:

$$i''_{о.н.эф} = i_{о.ж} - (i'_{ок})_{\text{мод}} = i_{о.ж} - 2I'_{0эф} \cdot e^{-(t'_{н.эф})_{\text{опт}}/T'_{эф}} - (2i_{\infty})_{\text{опт}}. \quad (13)$$

Затем в диапазоне $t''_{н.эф} - t''_{в.эф}$ в зависимости от степени зашумленности полученного массива первичной опытной информации для ее идентификации в ВСМ имеется несколько вариантов.

При удовлетворительной монотонности затухания сверхпереходной составляющей применение эффективных точечных выборок с первого элемента от начала процесса по (8) и (9) обеспечивает максимальную точность идентификации.

В случае сильной зашумленности сверхпереходной составляющей на начальном участке переходного процесса конструируется генеральная совокупность случайного признака τ''_{kj} объемом N по (2), (3), (4). Проводят исследования по аналогии с переходной составляющей с использованием эффективных точечных выборок.

В случае большой величины среднеквадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}''_k$ имеется возможность уточнения начального значения сверхпереходной составляющей с использованием модели всего переходного процесса, а также другие возможности ВСМ.

Результаты исследования и идентификации переходных процессов в опытах ВКЗ мощной СМ ТТК-50-2УЗ-П, 50 МВт

	Уровень испытательного напряжения		
	$0,1 \cdot U_{\text{ном}}$	$0,3 \cdot U_{\text{ном}}$	$0,7 \cdot U_{\text{ном}}$
Результаты исследований			
Генеральная совокупность			
Объем $N_{\text{исх}} (N_{\text{ск}})$	3051(3021)	64981(52255)	60355(57724)
МО $\bar{\tau}'_{0 \text{ исх}} (\bar{\tau}'_{0 \text{ ск}}), \text{с}$	0,713817(0,695265)	0,706169(0,754001)	0,827340(0,808653)
Дисперсия $\sigma_{0 \text{ исх}}^2 (\sigma_{0 \text{ ск}}^2), \text{с}^2$	0,056906(0,017434)	0,022915(0,013592)	0,019975(0,004362)
Размах случайного признака, %	511,0(210,2)	423,0(314,6)	348,8(94,6)
Выборка из генеральной совокупности			
Объем $n_{\text{исх}} (n_{\text{ск}})$	306(285)	16872(14813)	16225(16132)
МО $\bar{\tau}'_{\text{исх}} (\bar{\tau}'_{\text{ск}}), \text{с}$	0,717383(0,695351)	0,741753(0,754001)	0,81131(0,808649)
Дисперсия $\sigma_{\text{исх}}^2 (\sigma_{\text{ск}}^2), \text{с}^2$	0,011375(0,003006)	0,001763(0,000646)	0,002521(0,000905)
Размах случайного признака, %	150,4(66,8)	77,8(53,3)	237,2(63,4)
Эффективная точечная выборка			
Объем $n_{\text{эф}}$	4	4	4
МО $\bar{\tau}'_{\text{эф}}, \text{с}$	0,695280	0,754000	0,808652
Дисперсия $\sigma_{\text{эф}}^2, \text{с}^2$	0,000055	0,000021	0,000066
Размах случайного признака, %	2,5	1,4	2,1
Результаты идентификации			
Переходная составляющая			
Диапазон $(t'_{\text{н.эф}} - t'_{\text{в.эф}}), \text{с}$	0,430–1,210	0,358–1,208	0,7291–1,6491
$\bar{\tau}'_0, \text{с}$	0,695280	0,754000	0,808652
$2I'_{0 \text{ опт}}, \text{о.е.}$	1,1339	2,9702	6,5972
$2I'_{\infty \text{ опт}}, \text{о.е.}$	0,116	0,354	0,734
$\bar{\Delta}'_l, \text{о.е.}$	$\bar{\Delta}'_{79} = 0,003$	$\bar{\Delta}'_{86} = 0,005$	$\bar{\Delta}'_{93} = 0,009$
Сверхпереходная составляющая			
Диапазон $(t''_{\text{н.эф}} - t''_{\text{в.эф}}), \text{с}$	0,010–0,040	0,008–0,038	0,0091–0,0291
$\tau''_0, \text{с}$	0,038951	0,026034	0,016789
$2I''_{0 \text{ опт}}, \text{о.е.}$	0,3868	0,5828	2,4894
Среднеквадратичное отклонение по всему процессу			
$\bar{\Delta}_l, \text{о.е.}$	$\bar{\Delta}_{221} = 0,005$	$\bar{\Delta}_{221} = 0,006$	$\bar{\Delta}_{221} = 0,031$

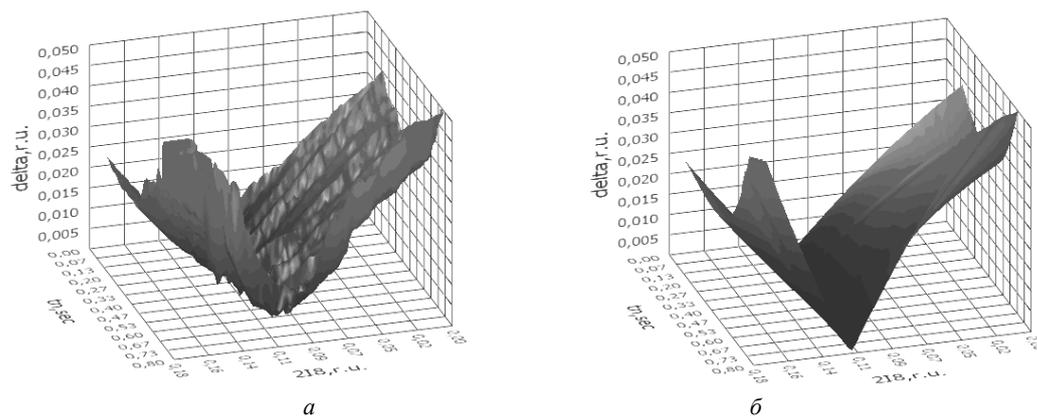


Рис. 2. Визуальное представление средней квадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}'$ при $0,1 \cdot U_{\text{ном}}$ в трехмерном измерении по результатам: *а* – опыта; *б* – модели

4. Апробация нового подхода исследования переходных процессов мощных СМ

Результаты апробации новых подходов к анализу погрешности идентификации переходных процессов в опытах ВКЗ получены по результатам стендовых испытаний СМ на 50 МВт для трех уровней испытательного

напряжения (0,1; 0,3; 0,7) $U_{\text{ном}}$ при $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$ и $I_{\text{ном}} = 3440 \text{ А}$ и представлены в таблице.

На рис. 2, *а* приведена среднеквадратичная погрешность приближения в виде дискретной поверх-

ности в трехмерном измерении, полученная по опыт-ным данным по выражению (12). На рис. 2, б пред-ставлена модель той же погрешности для лучшего восприятия наличия минимальных уровней погреш-ностей дискретных кривых парабол в виде образо-ванного «желоба».

Выводы

1. Анализ полученных результатов подтверждает, что, несмотря на значительный разброс искомых ПВ при стендовых испытаниях СМ, разработанный ва-риант исследования и идентификации переходных процессов, протекающих в условиях существенного влияния случайных факторов, обеспечивает высокую точность и достоверность ПВ.

2. Дополнительно к существующим стандартам на испытания СМ открываются новые возможности для получения достоверных ПВ переходных процес-сов в обмотках возбуждения и успокоительных с учетом сверхпереходных ПВ, полученных непосред-ственно из опытов ВКЗ.

3. В настоящее время проводятся исследования по применению рассмотренных в данной статье но-вых подходов для идентификации переходных процес-сов, предлагаемых отечественными стандартами на испытания мощных СМ.

4. Применение современных датчиков для получе-ния первичной информации с широким динамическим диапазоном измерения для записи ЦЗО с их широки-ми возможностями (хранения огромных объемов

цифровой информации, ее передачи через Интернет или электронной почтой, предусмотренным электри-ческим сопряжением с персональными компьютерами и т. д.), а также внедрением ВСМ на базе ТВ и МС для исследований и идентификации переходных процес-сов СМ позволяет надеяться на успешное внедрение новых подходов в технологию промышленных испы-таний мощных синхронных машин с меньшими тех-нико-экономическими затратами.

Библиографические ссылки

3. Судаков А. И., Чабанов Е. А., Шулаков Н. В. Вероятностно-статистические методы исследования переход-ных процессов мощных синхронных машин // Электротех-ника. – 2010. – № 8. – С. 22–29.

4. Судаков А. И., Чабанов Е. А., Шулаков Н. В. Модер-низация вероятностно-статистических методов исследова-ния переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 20–26.

5. Судаков А. И., Чабанов Е. А. Исследования по иденти-фикации переходных процессов мощных синхронных машин с минимальной погрешностью приближения статистической модели к результатам стендовых испытаний // Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments – 2011 : сб. тр. X Междунар. науч.-практ. конф. – М. : ДМК-пресс, 2011. – С. 194–196.

6. Судаков А. И., Чабанов Е. А., Шулаков Н. В. К во-просам исследования и идентификации переходных процес-сов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами // Электричество. – 2013. – № 3. – С. 34–39.

A. I. Sudakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University

E. A. Chabanov, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University

N. V. Shulakov, DSc in Engineering, Professor, Perm National Research Polytechnic University

Novel approaches to identification of transition processes by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines

The article is devoted to the development of probabilistic and statistical methods (PSM) of researching the long transient processes in synchro- nous machines (SM), occurring under the influence of various random factors. In particular, a new authentic method is explained that is oriented at minimizing the mean square error of approximation of the discrete statistical model of the transient component to the experimental data on a rela- tively long section of the discrete transition process. The model allows representing the found error in the form of a discrete surface in three dimen- sions.

Keywords: synchronous machine, transition process, identification, mean square error

Получено: 07.11.13

УДК 621.313.32.018.782.3:519.2-047.37

А. И. Судаков, кандидат технических наук, доцент;

Е. А. Чабанов, доцент;

Н. В. Шулаков, доктор технических наук, профессор;

С. В. Шутемов, старший преподаватель

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

РАЗВИТИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДОСТОВЕРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН В ОПЫТАХ ГАШЕНИЯ ПОЛЯ

Развитие новых подходов к методам идентификации длительных переходных процессов мощных синхронных машин в объеме требо- ваний стандартов Российской Федерации по результатам стендовых испытаний с использованием вероятностно-статистических методов (ВСМ). Объектами исследования при этом являются опыты гашения поля, протекающие в условиях влияния на данные процес- сы различных случайных факторов.