

НОВАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИИ И ЭКСПРЕСС-ОБРАБОТКИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН НА БАЗЕ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ*

Н.В. Шулаков, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
А.И. Судаков, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
Е.А. Чабанов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермский филиал Волжского государственного университета водного транспорта*
С.В. Шутемов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Отечественные стандарты на испытания мощных синхронных машин (более 100 кВА), на первый взгляд методологически безупречные, имеют недостатки из-за разброса электромагнитных постоянных времени и параметров мощных синхронных машин. Следовательно, эти методы неадекватно отражают переходные процессы в условиях влияния на них различных случайных факторов, могут привести к ошибочной настройке средств защиты от аварийных ситуаций синхронных генераторов, работающих в сетях энергоснабжения или в составе обслуживания сложнейших дорогостоящих технологических процессов, и, в конечном итоге, к тяжелым последствиям. Это послужило причиной поисков новых подходов к методам исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин и легло в основу исследований по проекту РФФИ № 13-08-96044. С целью поднятия точности и достоверности результатов идентификации переходных процессов мощных синхронных машин при этом естественным оказался выбор направления новых подходов для решения имеющихся проблем путем разработки вероятностно-статистических методов с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики.

Ключевые слова: синхронная машина, испытания, переходный процесс, исследования, обработка, параметры, постоянная времени, идентификация, случайный признак, математическое ожидание, дисперсия, критерий χ -квадрат, выборка, погрешность, моделирование, оптимизация.

Переходные процессы (ПП) мощных синхронных машин (МСМ) описываются дифференциальными уравнениями, решением которых являются экспоненциально

затухающие или возрастающие синусоидальные составляющие токов или напряжений до 10 с и более в опытах гашения поля (ГП), восстановления напряжения

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантом РФФИ № 13-08-96044.

(ВН), ударного возбуждения (УВ) переходной составляющей МСМ. Обмер вершин с шагом 0,02 с графоаналитическим методом (ГАМ) для получения дискретных огибающих с шагом 0,01 с колоссально трудоемок и практически небезошибочен.

Переходные процессы МСМ в обмотке якоря записываются современным интеллектуальным цифровым запоминающим осциллографом (ЦЗО) (рис. 1).

Далее, применяя стандартные операции фильтрации, сглаживания и выделения вершин, ПП синхронных машин (СМ) представляется в виде дискретного ПП с частотой следования вершин 0,02 с. Представление ПП в виде дискретных огибающих с шагом 0,01 секунды реали-

зовано математически благодаря выведенным интерполяционным коэффициентам второго порядка для унифицированных выражений (1), которые с использованием опытных вершин тока якоря и интерполяционных значений между амплитудами напряжения или тока якоря в опытах внезапного симметричного короткого замыкания (ВКЗ), ГП, ВН, УВ позволяют рассчитывать недостающие его значения между соседними вершинами в данных опытах, а в итоге их сумма в узлах дискретизации дает элементы ПП $i_{oj}(u_{oj})$.

Элемент $i_{oj}(\Delta T)$ в первом узле (при $0 \leq \Delta T \leq 0,01$ с) для опыта ВКЗ рассчитывают по (1) в узле ΔT , а последующие

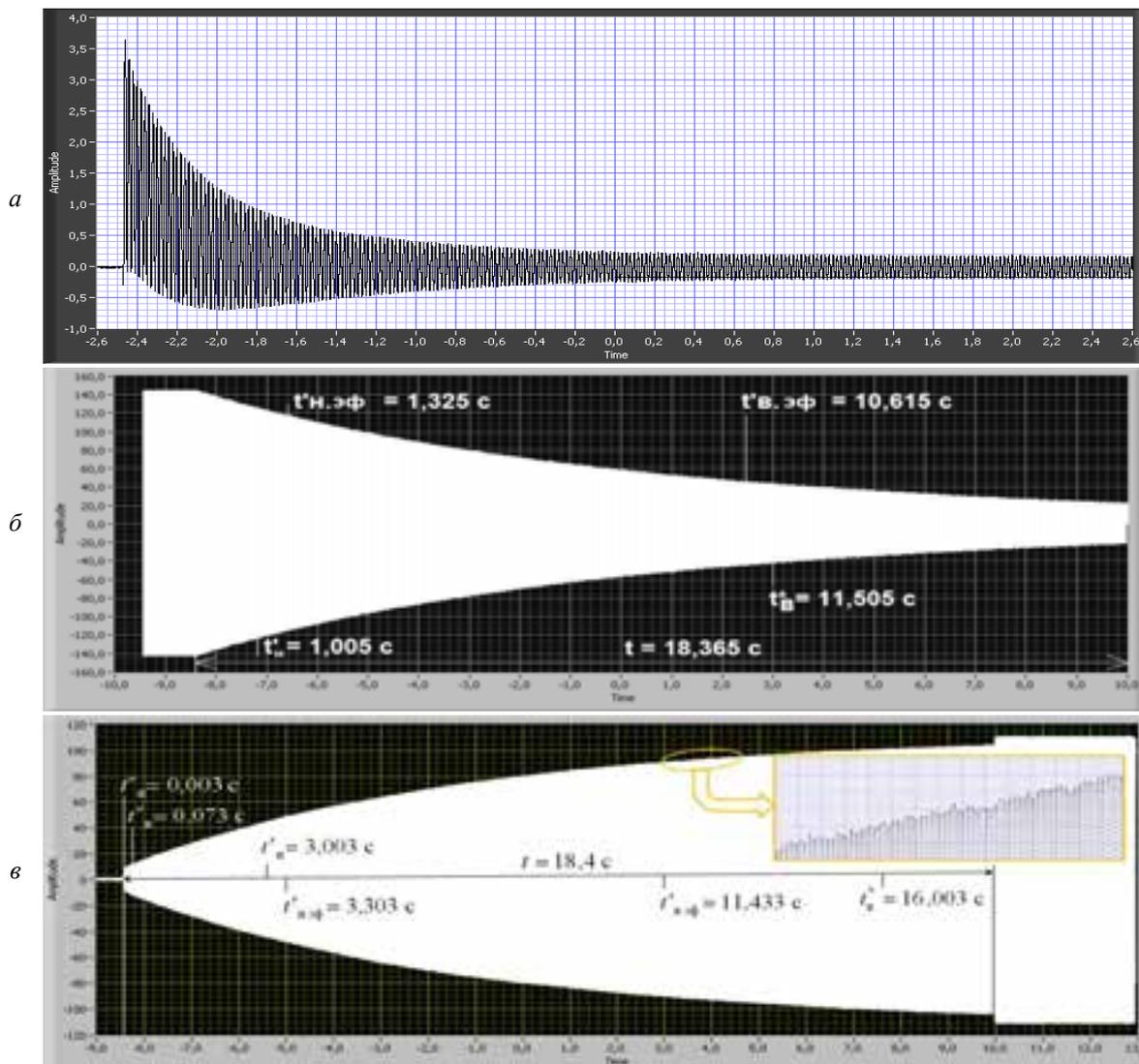


Рис. 1. Полный дискретный ПП МСМ: а – в опыте ВКЗ; б – ГП; в – ВН

элементы со 2-го шага до конца ПП для всех опытов рассчитывают в узлах дискретизации с шагом 0,01 с с образованием огибающих [1, 2, 4, 5, 7, 9]:

$$\left. \begin{aligned} i_{o1}(\Delta T) &= |\pm I_{B1} - (\mp i_{n1})|, \\ i_{n1}(\Delta T) &= \\ &= |1,875(\pm I_{B2}) - 1,25(\pm I_{B4}) + \\ &+ 0,375(\pm I_{B6})|, \\ i_{nj}(\Delta t) &= |0,375(\pm I_{B(j-1)}) + 0,75(\pm I_{B(j+1)}) - \\ &- 0,125(\pm I_{B(j+3)})| \text{ при } j=2, K. \end{aligned} \right\} (1)$$

В опытах ВКЗ дискретно рассчитанные элементы между огибающими по (1) дают симметричный ток, а асимметричный ток определяют по формуле

$$i_{aj}(\Delta t) = \frac{|I_{Bj} - (-i_{nj})|}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, формулы (1) и (2) исключают все графоаналитические операции стандартов для получения вершин в опытах ВКЗ и амплитудных значений напряжения или тока в остальных симметричных ПП СМ.

Дискретно заданный симметричный ток якоря в узлах дискретизации в опытах ВКЗ состоит из суммы дискретных удвоенных значений переходной, сверхпереходной составляющих и дискретной удвоенной величины установившегося значения тока якоря СМ

$$i_{cj}(\Delta t) = 2I_0'' \cdot e^{-t_k/\tau} + 2I_0' \cdot e^{-t_k/\tau} + 2I_\infty. \quad (3)$$

В опытах ВН и УВ симметричная составляющая ПП определяется переводом дискретно возрастающего ПП в затухающий:

$$u_\infty - u_{oj} = u_{oj}'' + u_{oj}'. \quad (4)$$

Разность по (4) представляет собой сумму сверхпереходной и переходной составляющих в узлах дискретизации, затухающей с шагом 0,01 с, аналогично ПП в опытах ГП. Разделение симметричного тока (или напряжения) на переходную и сверхпереходную составляющие в любых опытах требует новых подходов для решения проблем идентификации и исследования, особенно продолжительных ПП

из-за влияния различных случайных факторов и разброса конечных результатов идентификации.

Решением данных проблем является использование основ теории вероятностей и математической статистики (ТВиМС). Для этого на базе логарифмического декремента синусоидально затухающих (возрастающих) составляющих ПП через отношение двух соседних вершин был получен случайный признак в виде kj -й постоянной времени (ПВ) [1, 2, 4, 5, 7, 8]:

$$\tau_{kj} = \frac{t'_j - t'_k}{\ln \left| \frac{i'_{oj}}{i'_{oj}} \right|} = \frac{t'_B - t'_H}{\ln \left| \frac{i'_H}{i'_B} \right|}, \quad (5)$$

где $k = \overline{1, K}$, K – переменная для задания нижней границы; $j = \overline{k+1, K}$, K – переменная для задания верхней границы. K – элементы между нижней и верхней границами в исследуемом диапазоне $t'_{н1\phi} - t'_B^*$ ПП с самой длительной переходной составляющей (рис. 1, б; 1, в). Во всех опытах нижняя граница для исследуемого участка ПП с одной переходной составляющей выбирается из условия затухания сверхпереходной составляющей до величины менее одного процента через $5\tau''$. Верхняя граница – из условия превышения переходной составляющей над установившимся значением ПП не менее 20%. ПВ по выражению (5) принята за **базовый случайный признак**, являющийся точечной выборкой объемом $n = 2$, что позволяет легко конструировать объем N генеральной совокупности (ГС) случайного признака с охватом всех элементов K , находящихся в диапазоне $t'_{н1\phi} - t'_B^*$ на участке ПП с переходной составляющей, а также выборку из нее объемом n для исследования свойств вариационных рядов ($\tilde{\tau}'_0, \tilde{\tau}'_B$ – математических ожиданий (МО) и σ_0^2, σ_B^2 – дисперсий):

$$N = \sum_{\substack{k=1 \\ j=k+1}}^K \tau_{kj} + \sum_{\substack{k=2 \\ j=k+1}}^K \tau_{kj} + \dots + \sum_{\substack{k=K-1 \\ j=k+1}}^K \tau_{kj}, \quad (6)$$

$$\bar{t}_b = \sum_1^N t_{kj} / N, \sigma_0^2 = \sum_1^N (t_{kj} - \bar{t}_b)^2 / N, (7)$$

$$n_b = \sum_{k=1}^K t_{kj} + \sum_{k=2}^K t_{kj} + \sum_{k=3}^K t_{kj} + \dots, (8)$$

$$\bar{t}_b = \sum_1^n t_{kj} / n_b, \sigma_b^2 = \sum_1^n (t_{kj} - \bar{t}_b)^2 / n_b. (9)$$

На базе сконструированных комбинаторных выражений (6)–(9) подтверждается нормальный закон распределения случайного признака с использованием критерия Пирсона χ -квадрат. На рис. 2 представлены гистограммы, подтверждающие нормальный закон отклонения случайного признака от МО для очень длительного ПП в опыте ГП.

Исследования вариационных (упорядоченных по возрастанию или убыванию) рядов случайного признака позволяют оценить по разбросу случайного признака уровень зашумленности ПП, а по коэффициенту вариации – степень отклонения процесса от экспоненциального затухания с учетом влияния различных случайных факторов. Исследованиями натуральных испытаний МСМ в опытах ГП установлен разброс случайного признака от 46% до 300%, в опытах ВКЗ – от 348% до 511%.

В процессе исследования вариационных рядов по опытным данным ПП выявилось существование kj -х ПВ, отклоняющихся от МО с минимальной относительной погрешностью, которые названы **эффективными точечными выборками (ЭТВ)**:

$$\tau_{\Phi} = |t_{н.эф} - t_{в.эф}| / |\ln |i_{о.н.эф} / i_{о.в.эф}|. (10)$$

Верхняя граница элемента ПП в (10) определяется по аналитически выведенному коэффициенту, жестко связывающему верхний элемент с нижним для любой составляющей ПП СМ с синусоидальной формой электрического сигнала, затухающего или возрастающего по экспоненциальному закону для любых составляющих ПП СМ [1, 2, 4, 5, 7]:

$$i_{о.в.эф} = 0,33 \cdot i_{о.н.эф}. (11)$$

Коэффициент в (11) позволяет легко

извлекать ЭТВ из любого объема ГС случайного признака, созданного на основе опытных данных для любых составляющих ПП. Исследованиями установлено, что количество ЭТВ составляет в ПП менее одного процента от объема ГС, их появление можно сравнить с редкими событиями в ГС случайного признака. Таким образом, **в новых подходах к исследованию и идентификации ПП МСМ на базе распределения Пуассона решена проблема минимизации объема ЭТВ с высокой степенью вероятности**, равного объему из **четырёх ЭТВ**, который эффективно использован для дальнейшего теоретического развития погрешностного анализа ПП. Минимизированный объем ЭТВ позволил конструировать унифицированные формулы для идентификации переходной составляющей для всех ПП МСМ

$$\bar{t}_{\Phi} = \frac{1}{4} \left[\sum_{j=1}^2 \frac{|(t_{bj} - t_{н1})'|}{\ln \left| \frac{i'_{о.н1}}{i'_{о.вj}} \right|} + \sum_{j=1}^2 \frac{|(t_{bj} - t_{н2})'|}{\ln \left| \frac{i'_{о.н2}}{i'_{о.вj}} \right|} \right] (12)$$

$$\text{при } j=1, 2; 2\tilde{t}'_0 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (i'_{о.нj})_L \cdot e^{\frac{(t_{нj})_L}{\tau_{\Phi j}}},$$

при $j=1, 4$ и

$$L = ((ENTIER(j-1) / 2) + 1) -$$

для менее длительных ПП МСМ,

$$\bar{t}_{\Phi} = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1}^4 t_{k_{эф} j_{эф}},$$

$$2\tilde{t}'_{0эф} = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1}^4 i'_{о.к_{эф}} \cdot e^{\frac{t_{к_{эф}} + \Delta T}{\tau_{\Phi}}} - \text{для} (13)$$

продолжительных ПП МСМ,

а также позволил **впервые** по результатам исследований **разработать способ визуального представления среднеквадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}'$ в виде дискретной поверхности в трехмерном измерении** (рис. 3, а, б для опыта ВКЗ) с использованием статистической функции для минимизации погрешности приближения:

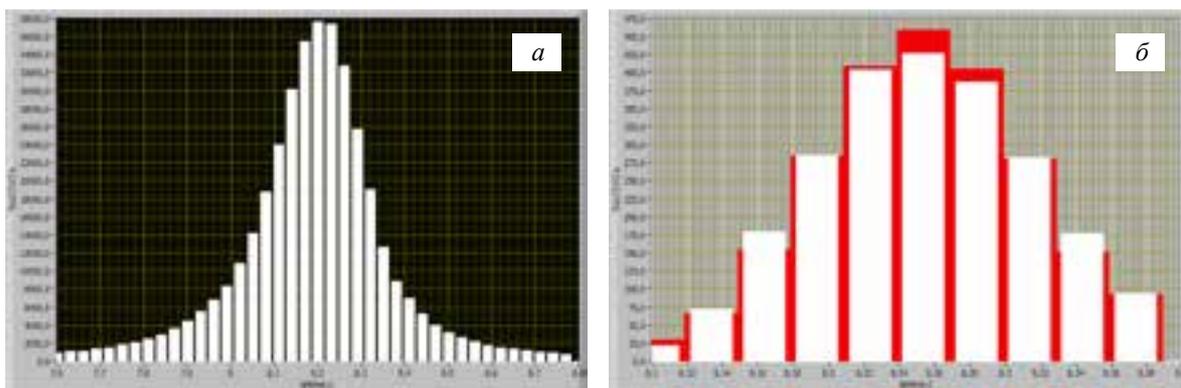


Рис. 2. Результаты исследования ПП по данным опыта ГП в диапазоне $i'_{н.эф} - i_e^*$

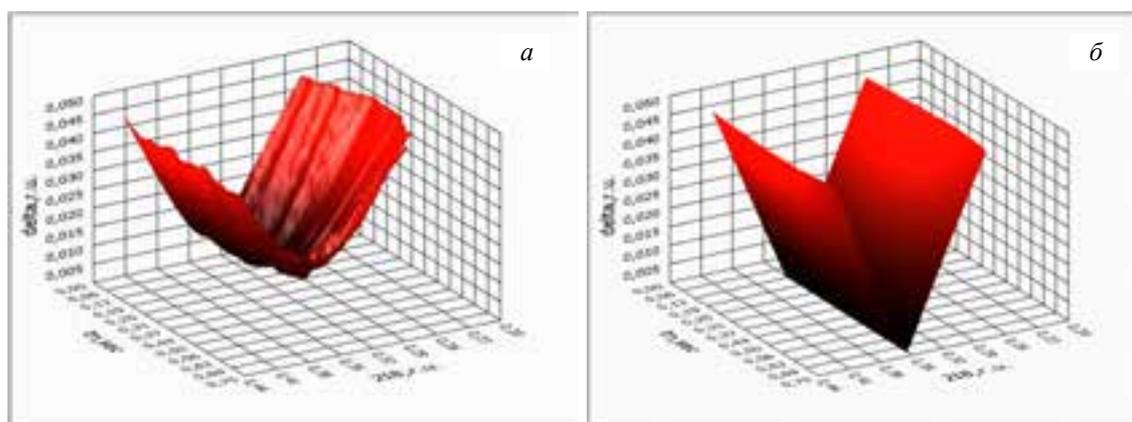


Рис. 3. Визуальное представление среднеквадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}'_K$ переходной составляющей в диапазоне $i'_{н.эф} - i_e^*$ в опыте ВКЗ:
а – по опытным данным ПП; б – для модели

$$\begin{aligned}
 [\bar{\Delta}'_K]_{\min} &= \\
 &= \sqrt{\frac{1}{K} \sum_1^K [(i'_{ок}(\Delta t))_{\text{мод}} - (i_{ок}(\Delta t))_{\text{оп}}]^2}, \\
 (i'_{ок}(\Delta t))_{\text{мод}} &= \\
 &= 2I'_{0эф} \cdot e^{-(i'_{н.эф})_{\text{вар}} / i_{5ф}} + (2i_{\infty})_{\text{вар}}, \\
 (i_{ок}(\Delta t))_{\text{оп}} &\text{ – элементы ПП на базе} \\
 &\text{опытных данных по (1)}.
 \end{aligned}$$

Разработанный способ минимизации по формуле (14) среднеквадратичной погрешности приближения с процедурами оптимизации и программирования переходной составляющей на каждом шаге реализован алгоритмически. В трехмерной системе координат реализуются дискретно заданные кривые изменения погрешности $\bar{\Delta}'$ в виде парабол с минимальным уровнем погрешности на каждом шаге с новым неизменным значением

нижней границы $(i'_{н.эф} + \Delta t)$ варьированием установившегося значения тока якоря. В итоге получают поверхность в виде дискретно рассчитанных кривых-парабол. В зависимости от вариации величины шага изменения нижней границы $i'_{н.эф}$ поверхность погрешности выглядит сплошной или разряженной в виде набора рассчитанных парабол.

Процесс минимизации среднеквадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}'$ по выражению (14) на участке исследования переходной составляющей завершается автоматической выдачей единственного результата идентификации переходной составляющей по (12) или (13) с наименьшей возможной погрешностью приближения по (14) и полной дискретной поверхностью погрешности приближения в трехмерном измерении. Идентификация остальных составляющих ПП

в опытах ВКЗ, ГП, ВН, УВ (сверхпереходной, аperiодической только для ВКЗ) осуществляется аналогично переходной составляющей с конструированием более простых формул для определения ПВ и начальных значений с использованием разовых ЭТВ или минимизированного объема ЭТВ в зависимости от объема исходной информации от начала ПП до нижней границы $t'_{н.эф}$ и от уровня зашумленности ПП. Идентификация сверхпереходной составляющей с учетом условия в (11) осуществлена по разности между элементами ПП по (1) и ве-

личинами, смоделированными по результатам оптимизации переходной составляющей

$$i''_{о.н.эф} = i_{о.ж} - (i'_{0к})_{\text{мод}} = i_{о.ж} - 2I'_{0эф} \cdot e^{-(t'_{н.эф})_{\text{опт}} / \tau'_{эф}} - (2i_{\infty})_{\text{опт}}. \quad (15)$$

Результаты идентификации и исследования ПП для опытов ВКЗ по результатам стендовых испытаний МСМ на 50 МВт приведены в таблице (аналогичные исследования проводились для опытов ГП и ВН).

Новые подходы и формулы для идентификации и исследования опытов ВН

Результаты исследования и идентификации ПП (ВКЗ) МСМ ТТК-50-2УЗ-П

Параметр	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 $\tilde{\tau}'_{0 \text{ исх}} (\tilde{\tau}'_{0 \text{ ск}})$, с	0,713817(0,695265)	0,706169(0,754001)	0,827340(0,808653)
Дисперсия $\sigma^2_{0 \text{ исх}} (\sigma^2_{0 \text{ ск}})$, 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 $\tilde{\tau}'_{\text{исх}} (\tilde{\tau}'_{\text{ск}})$, с	0,717383(0,695351)	0,741753(0,754001)	0,81131(0,808649)
Дисперсия $\sigma^2_{\text{исх}} (\sigma^2_{\text{ск}})$, 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)
Минимизированный объем ЭТВ			
Объем $n_{\text{эф}}$	4	4	4
МО $\tilde{\tau}'_{\text{эф}}$, с	0,695280	0,754000	0,808652
Дисперсия $\sigma^2_{\text{эф}}$, с ²	0,000055	0,000021	0,000066
Размах случайного признака, %	2,5	1,4	2,1
Результаты идентификации			
Переходная составляющая			
Диапазон $(t'_{н.эф} - t'_{в.эф})$, с	0,430-1,210	0,358-1,208	0,7291-1,6491
$\tilde{\tau}'_0$, с	0,695280	0,754000	0,808652
$2I'_0$, о.е.	1,1339	2,9702	6,5972
$2I_{\infty}$, о.е.	0,116	0,354	0,734
$\bar{\Delta}'_7$, о.е.	$\bar{\Delta}'_{79} = 0,003$	$\bar{\Delta}'_{86} = 0,005$	$\bar{\Delta}'_{93} = 0,009$
Сверхпереходная составляющая			
Диапазон $(t''_{н.эф} - t''_{в.эф})$, с	0,010-0,040	0,008-0,038	0,0091-0,0291
τ''_0 , с	0,038951	0,026034	0,016789
$2I''_0$, о.е.	0,3868	0,5828	2,4894
Среднеквадратичная погрешность приближения идентифицированного ПП к опытным данным			
$\bar{\Delta}'_7$, о.е.	$\bar{\Delta}_{221} = 0,005$	$\bar{\Delta}_{221} = 0,006$	$\bar{\Delta}_{221} = 0,031$

полностью распространяются на опыты УВ с заменой лишь напряжений на токи в случае короткозамкнутой обмотки статора при испытаниях МСМ.

Идентификацию в цепях возбуждения и успокоительных обмотках с учетом высокоточных и достоверных полученных результатов в опытах ГП и ВКЗ МСМ в условиях неизбежных случайных факторов целесообразно сохранить расчетом ПВ обмоток возбуждения и успокоительных по предложенным отечественными стандартами в п. 24.7 ГОСТ 10169-77 формулам с меньшей трудоемкостью. Развитие, связанное с получением ПВ по продольной оси МСМ для контуров возбуждения и успокоительного по результатам осциллографирования ПП в опытах ГП, заключается в том, что из-за невозможного их получения из одной осциллограммы ПП в обмотке якоря в опытах ГП традиционным способом в данной статье на реальных опытах ГП и ВН показано, что с использованием ВСМ и ЦЗО сверхпереходные ПВ можно успешно и точно получать из одной осциллограммы ПП в обмотках якоря МСМ. Это стало возможным благодаря разработанному *способу минимизации погрешности $\bar{\Delta}'$ с использованием минимизированного объема ЭТВ*, позволяющему, например, выявить влияние шага вариации установившегося значения от остаточного намагничивания в опытах ГП и нижней границы исследуемой переходной составляющей, так как от точности идентификации ее зависит точность идентификации сверхпереходной составляющей ПП. Самым поразительным результатом из представленных дискретных поверхностей в трехмерном измерении является то, что из фантастически огромного объема случайного признака ГС, например, в опыте ГП ($N_0 = 431985$) для идентификации переходной составляющей, достаточным является выбор единственного минимизированного объема ЭТВ, равного $n_{эф} = 4$ с наименьшей возможной погрешностью

приближения $(\bar{\Delta}')_{\min} = 0,363$ о.е. В опыте ВКЗ при объеме ГС $N_0 = 60355$, при том же объеме $n_{эф} = 4$ ЭТВ, наименьшая возможная погрешность приближения составила $(\bar{\Delta}')_{\min} = 0,031$ о.е. Это является одним из *основных достижений теоретических основ впервые предложенного нового неординарного подхода к исследованию и идентификации ПП МСМ на базе ТВиМС*.

Такое попадание в МО минимизированного объема на базе четырех ЭТВ с наименьшей возможной погрешностью приближения невозможно достигнуть даже в ТВиМС с использованием ее классического способа интервальных оценок. Погрешность приближения для всего ПП определяется аналогично формуле (14) с учетом всех составляющих ПП.

Индуктивные сопротивления переходной и сверхпереходной составляющих ПП в опытах ВКЗ, ГП, ВН, УВ определяются по известным формулам в промышленных испытаниях СМ. **ВСМ исследования длительных ПП МСМ**, протекающих в условиях влияния на данные процессы различных случайных факторов, *обладают огромными потенциальными возможностями для своего развития:*

1. Предложен новый подход к определению ударного тока по результатам стендовых испытаний в опытах ВКЗ без получения и использования параметров идентификации, подробно подход изложен в [3], где представлены результаты исследования по расчету ударного тока в соответствии со стандартами на методы испытания более 100 кВА при рекомендуемом времени 0,01 с от начала ПП не всегда соответствует положению первой наибольшей вершины в данном узле. Поэтому расчет ударного тока математически будет некорректным из-за отсутствия в данном месте первой вершины. Предложенный в [3] расчет ударного тока по первой вершине в узле ΔT содержит все составляющие симметричного тока с установившимся значением, а так-

же асимметричным током якоря обеспечивает более точную оценку ударного тока, что существенно снижает трудоемкость обработки.

2. Разработан новый неординарный метод точной оценки косвенно определяемых переходных и сверхпереходных индуктивных сопротивлений МСМ по оси q из опытов ВКЗ [6], который стандартами не предусматривается. Разработка аналитических методов определения индуктивных сопротивлений по оси q позволяет разрешить проблему снижения

себестоимости производств СМ в процессе проектирования за счет оптимизации воздушного зазора.

3. Получение высокоточных и достоверных электромагнитных ПВ из рассматриваемых ПП приобретает важное значение для разработки средств защиты СМ от внезапных коротких замыканий как в самой машине, так и за ее пределами при их эксплуатации в различных электрических сетях.

Указанные проблемы остаются актуальными по настоящее время.

Библиографический список

1. *Sudakov A.I., Chabanov E.A., Shulakov N.V.* Novel approaches to analysis of transition processes identification error by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). – 2013. – Vol. 58. – № 4. – P. 381–392.
2. *Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В.* К вопросам исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами // Электричество. – 2013. – № 3. – С. 34–39.
3. *Чабанов Е.А., Судаков А.И.* Новые подходы достоверного определения ударного тока якоря синхронной машины // Электротехника. – 2014. – № 11. – С. 42–46.
4. *Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В., Шутемов С.В.* Новые подходы идентификации переходных процессов синхронных машин в опытах внезапного симметричного короткого замыкания вероятностно-статистическими методами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2(22). – С. 207–213.
5. *Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В., Шутемов С.В.* Развитие возможностей вероятностно-статистических методов достоверной идентификации длительных переходных процессов мощных синхронных машин в опытах гашения поля // Там же. – С. 213–220.
6. *Чабанов Е.А., Судаков А.И.* Метод точной оценки косвенно определяемых величин в электромеханике // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – № 9. – С. 62–70.
7. *Чабанов Е.А., Судаков А.И., Турпак А.М., Лоскутников В.А.* Вероятностно-статистические методы идентификации синусоидально возрастающих переходных процессов синхронных машин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12(10). – С. 2135–2141.
8. *Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шутемов С.В.* Новые подходы к погрешностному анализу результатов исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Вест. ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 8. – С. 166–172.
9. *Чабанов Е.А., Судаков А.И., Шулаков Н.В.* Новые подходы к получению исходной информации и методам идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Там же. – С. 114–127.

**NEW STRATEGY OF RESEARCH, IDENTIFICATION
AND EXPRESS-PROCESSING THE TRANSIENT PROCESSES OF POWERFUL
SYNCHRONOUS MACHINES BASED ON THEORY OF CHANCES
AND MATHEMATICAL STATISTICS ON THE RESULTS OF BENCH TESTS**

N.V. Shulakov¹, A.I. Sudakov¹, E.A. Chabanov^{1,2}, S.V. Shutemov¹

¹ Perm National Research Polytechnic University

² Perm Branch of Volga State University of Water Transport

Domestic standards for testing high-power synchronous machines (over 100 kVA) are at first sight methodologically impeccable but in fact have drawbacks due to the dispersion of electromagnetic time constants and the parameters of high-power synchronous machines. Therefore, these methods do not adequately reflect the transient processes under effect of different random factors and may lead to an erroneous setting of protection from emergencies of synchronous generators operating in the power networks or as part of maintenance of costly complex technological processes, and, finally, to serious consequences. This was the reason for the search of new approaches to the methods of research and identification of the transient processes of powerful synchronous machines and formed the basis for RFBR research project № 13-08-96044. In order to raise the accuracy and reliability of the results of the identification of the transient processes of powerful synchronous machines at the same time, the choice of the direction of new approaches to solving the existing problems proved to be natural through the development of probabilistic and statistical methods with the use of elements of probability theory and mathematical statistics.

Keywords: synchronous machine, test, transient process, research, processing, parameters, time constant, identification, random factor, mathematical expectation, variance, chi-square test, sample, error, modeling, optimization.

Сведения об авторах

Шулаков Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электромеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: shulakov@pstu.ru

Судаков Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики, ПНИПУ; e-mail: sudakov38@mail.ru

Чабанов Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики, ПНИПУ; доцент кафедры технических дисциплин, Пермский филиал Волжского государственного университета водного транспорта (ПФ ВГУВТ), 614060, г. Пермь, бульвар Гагарина, 33,35; e-mail: ceapb@mail.ru

Шутемов Сергей Владимирович, старший преподаватель кафедры электротехники и электромеханики, ПНИПУ; e-mail: shutemovsv@mail.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.