ности в трехмерном измерении, полученная по опытным данным по выражению (12). На рис. 2, *б* представлена модель той же погрешности для лучшего восприятия наличия минимальных уровней погрешностей дискретных кривых парабол в виде образованного «желоба».

Выводы

1. Анализ полученных результатов подтверждает, что, несмотря на значительный разброс искомых ПВ при стендовых испытаниях СМ, разработанный вариант 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 процессов в обмотках возбуждения и успокоительных с учетом сверхпереходных ПВ, полученных непосредственно из опытов ВКЗ.

3. В настоящее время проводятся исследования по применению рассмотренных в данной статье новых подходов для идентификации переходных процессов, предлагаемых отечественными стандартами на испытания мощных СМ.

4. Применение современных датчиков для получения первичной информации с широким динамическим диапазоном измерения для записи ЦЗО с их широкими возможностями (хранения огромных объемов цифровой информации, ее передачи через Интернет или электронной почтой, предусмотренным электрическим сопряжением с персональными компьютерами и т. д.), а также внедрением ВСМ на базе ТВ и МС для исследований и идентификации переходных процессов СМ позволяет надеяться на успешное внедрение новых подходов в технологию промышленных испытаний мощных синхронных машин с меньшими технико-экономическими затратами.

Библиографические ссылки

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

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

5. *Судаков А. И., Чабанов Е. А*. Исследования по идентификации 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 вопросам исследования и идентификации переходных процессов 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 synchronous 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 relatively long section of the discrete transition process. The model allows representing the found error in the form of a discrete surface in three dimensions.

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 требований 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 процессы различных случайных факторов.

© Судаков А. И., Чабанов Е. А., Шулаков Н. В., Шутемов С. В., 2013

Ключевые слова: синхронная машина, переходный процесс, исследование, идентификация, постоянная времени, среднеквадратичная погрешность

Научный коллектив Пермского национального исследовательского политехнического университета в составе проф. Н. В. Шулакова, 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 идентификации переходных процессов мощных синхронных машин в объеме требований стандартов Российской Федерации по результатам стендовых испытаний.

Новые подходы к вопросам исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин (СМ) опубликованы в [1], там же обоснована актуальность поставленной задачи.

Настоящая статья посвящена новому развитию вероятностно-статистических методов (ВСМ) исследования и идентификации длительных переходных процессов в опытах ГП, хотя разработки ВСМ начались с опытов ВКЗ [2–4]. В отличие от опытов ВКЗ, переходные процессы в опытах ГП сильнее подвергаются влиянию различных случайных факторов из-за более длительного времени их протекания. Поэтому в [1] для опытов ГП разработан новый, неординарный *метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения* $\overline{\Delta}'$ дискретной статистической модели переходной составляющей к опытным данным в узлах дискретизации сравнительно длительного участка дискретного затухающего переходного процесса, в котором данная погрешность представлена в виде образованной *дискретной поверхности в трехмерном измерении*. Поставленная цель достигнута использованием процедуры *оптимизации* установившегося значения от остаточного намагничивания и одновременно нижней границы в составе статистической функции для исследуемого участка переходного процесса. Применением к тому же в узлах дискретного переходного процесса процедур статистического моделирования соответствующей составляющей с варьированием шага оптимизируемых величин позволяют глубоко и эффективно исследовать и достоверно идентифицировать переходные процессы в опытах ГП в условиях влияния на них различных случайных факторов.

Разделение дискретных огибающих переходных процессов на составляющие с использованием аналитических способов в условиях зашумленности и влияния на переходные процессы случайных факторов из-за многозначности конечных результатов идентификации не обеспечивает ее высокой точности и, главное, нужной достоверности. Поэтому этап разделения дискретных огибающих переходных процессов СМ на составляющие в опытах ГП, как и в опытах ВКЗ, также требует обязательного исследования степени зашумленности исходной статистической информации с использованием статистических методов на базе теории вероятностей и математической статистики (ТВ и МС).

ВСМ для проведения исследований переходных процессов СМ в опытах ГП включают:

- разделение дискретного симметричного напряжения или тока якоря СМ на переходную и сверхпереходную составляющие;
- обоснование границ $t'_{\text{н}} - t^*_{\text{в}}$ с целью проведения корректных исследований по используемой опытной локальной информации дискретного процесса для идентификации переходной составляющей;
- исследования в диапазоне переходного процесса $t'_{\text{н}} - t^*_{\text{в}}$, связанные с подтверждением предполагаемого нормального закона распределения случайного признака по его генеральной совокупности, выборки из него и минимальному объему эффективных точечных выборок; с оценкой близости параметров генеральной совокупности, выборки из него с параметрами минимального объема эффективных точечных выборок; с оценкой степени зашумленности опытных данных переходной составляющей, характеризуемой, с одной стороны, величиной размаха случайного признака в вариационных рядах, а с другой – степенью отклонения затухания переходной составляющей от экспоненциального закона;
- исследования на базе эффективных точечных выборок по унифицированным формулам влияния на результаты идентификации переходной составляющей установившегося значения от остаточного намагничивания $2U_{\infty}$ и нижней границы $t'_{\text{н}}$;
- минимизацию среднеквадратичной погрешности приближения $\overline{\Delta}'$, статистической модели переходной составляющей к опытным данным переходного процесса, с представлением погрешности в виде дискретной поверхности в трехмерном измерении (способ разработан впервые для опыта ГП).

Идентификация составляющих симметричного переходного процесса в опытах ГП, в отличие от опытов ВКЗ, осуществляется без асимметричной составляющей и ударного тока ВКЗ. Для проведения исследований в [1–3] разработан спектр формул, которые эффективно используются также для исследования и идентификации переходных процессов в опытах ГП:

$$\tau_{kj} = \left(t_j - t_k\right) \Big/ \ln\left|i_{ok} / i_{oj}\right|, \tag{1}$$

$$\left.\begin{aligned} N_K^n &= K!/[n!(K-n)!], \\ K &= (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})/\Delta t + 1, \\ N &= \sum_{\substack{k=1 \\ j=k+1}}^{K} \tau'_{kj} + \sum_{\substack{k=2 \\ j=k+1}}^{K} \tau'_{kj} + \ldots + \sum_{\substack{k=K-1 \\ j=k+1}}^{K} \tau'_{kj}, \\ \tilde{\tau}'_0 &= \sum_{1}^{N} \tau'_{kj} / N,\ \sigma_0^2 = \sum_{1}^{N} (\tau'_{kj} - \tilde{\tau}'_0)^2 / N, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned} n_{\text{в}} &= \sum_{\substack{k=1\\ j=k+1}}^{K} \tau'_{kj} + \sum_{\substack{k=2\\ j=k+1}}^{K} \tau'_{kj} + \sum_{\substack{k=3\\ j=k+1}}^{K} \tau'_{kj} + \dots \ , \\ \tilde{\tau}'_{\text{в}} &= \sum_{1}^{n} \tau'_{kj} / n_{\text{в}},\ \sigma^2_{\text{в}} = \sum_{1}^{n} (\tau'_{kj} - \tilde{\tau}')^2 / n_{\text{в}}, \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

$$\left.\begin{aligned} n_{\text{эф}} = 4,\ \ \tilde{\tau}'_{\text{эф}} &= \frac{1}{4} \sum_{\substack{k_{\text{эф}}=1\\ j_{\text{эф}}}}^{4} \tau'_{k_{\text{эф}} j_{\text{эф}}},\quad 2\tilde{U}'_{0\text{эф}} = \frac{1}{4} \sum_{k_{\text{эф}}=1}^{4} u'_{0k_{\text{эф}}} \cdot e^{\frac{t_{k_{\text{эф}}} + \Delta T}{\tilde{\tau}'_{\text{эф}}}}, \\ \text{МО} = \tilde{\tau}'_{\text{эф}} &= \frac{1}{4} \sum_{\substack{k_{\text{эф}}=1\\ j_{\text{эф}}}}^{4} \tau'_{k_{\text{эф}} j_{\text{эф}}},\quad \sigma^2_{\text{эф}} = \frac{1}{4} \sum_{\substack{k_{\text{эф}}=1\\ j_{\text{эф}}}}^{4} (\tau'_{k_{\text{эф}} j_{\text{эф}}} - \tilde{\tau}'_{\text{эф}})^2, \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} [\bar{\Delta}'_K]_{\min} &= \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{1}^{K} [(u_{ok})_{\text{мод}} - (u_{ok})_{\text{оп}}]^2} \text{ в диапазоне } \ t'_{\text{н}} - t^*_{\text{в}}, \\ (u_{o.k})_{\text{мод}} &= 2U'_{0\text{эф}} \cdot e^{-(t'_{\text{н.эф}})_{\text{опт}} / \tilde{\tau}'_{\text{эф}}} + (2u_{\infty})_{\text{опт}}, \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

$$\tau''_{\text{эф}} = \frac{(t''_{\text{в}} - t''_{\text{н}})}{\ln \left| \dfrac{u''_{\text{о.н.эф}}}{u''_{\text{о.вэф}}} \right|},\ 2U''_{0.\text{эф}} = u''_{\text{о.н.эф}} \cdot \mathrm{e}^{\frac{t''_{\text{н}}}{\tau''_{\text{эф}}}},\ u''_{\text{о.в.эф}} = 0{,}33 \cdot u''_{\text{о.в.эф}}, \quad (6)$$

$$\bar{\Delta}(t_k) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \left[u_{\text{о.мод}}(\Delta t_k) - u_{\text{о.оп}}(\Delta t_k) \right]^2} \quad (7)$$

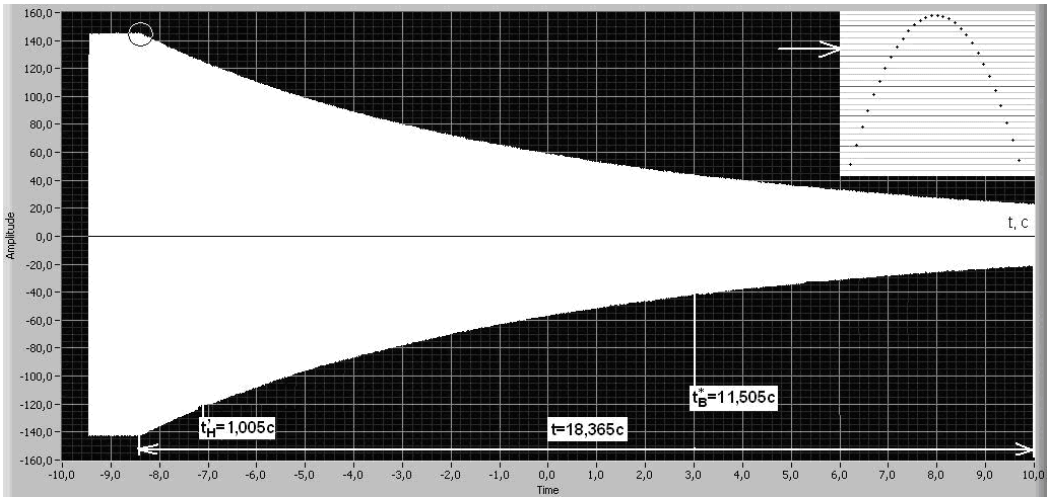
в диапазоне $t'_{\text{н}} - t^*_{\text{в}}$.

При исследованиях переходного процесса с замкнутой ОС в формулах (1)–(7) вместо напряжений следует брать токи.

На рис. 1 для самого продолжительного переходного процесса с разомкнутой ОС представлена гистограмма распределения случайного признака в диапазоне $t'_{\text{н}} - t^*_{\text{в}}$ по полному объему N (2) генеральной совокупности и выборке $n_{\text{в}}$ из него (3) с подтверждением гипотезы нормального распределения базового случайного признака (1) с использованием известного критерия согласия χ^2. Анализ сходимости параметров сравниваемых вариационных рядов хорошо подтверждается по первому центральному моменту.

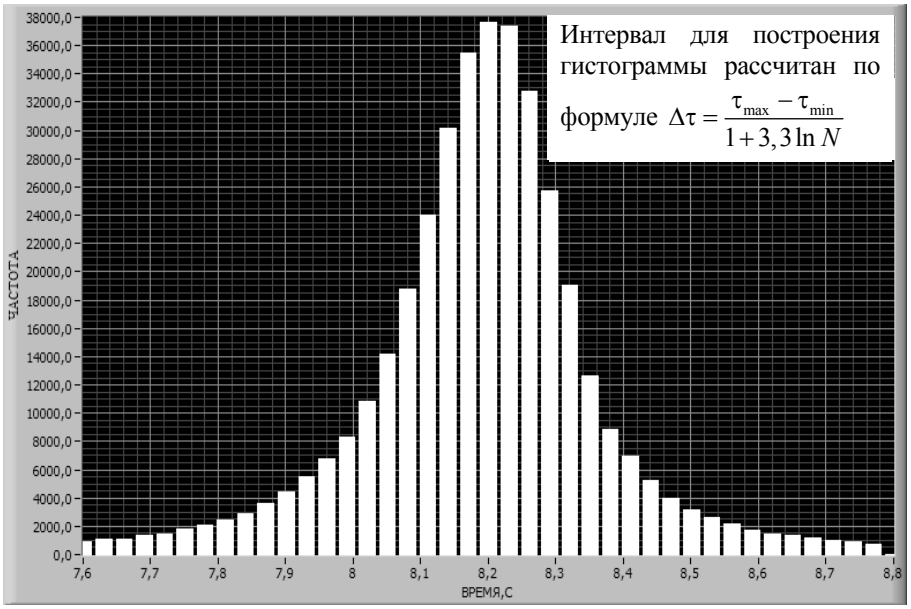
Существенный разброс дисперсий между сравниваемыми рядами вызван значительной зашумленностью переходного процесса, что объясняется большим размахом случайного признака до 148 % в генеральной совокупности и до 154 % в выборке из него. После сортировки упорядоченных рядов дисперсия уменьшилась за счет лучшего приближения первого центрального момента к базовому значению минимального объема эффективных точечных выборок (табл. 1). Результаты исследований в табл. 1 подтверждают эффективность предложенного способа сближения параметров генерального ряда и выборки из него. Это достигается корректной сортировкой случайного признака в рядах и непрерывным сравнением результатов с параметрами минимального объема эффективных точечных выборок.

Разработанный способ минимизации погрешности $\bar{\Delta}'$ с использованием эффективных точечных выборок позволяет расширить спектр возможных направлений в исследованиях с переходной составляющей. Например, сильное уменьшение шага вариации установившегося значения от остаточного намагничивания резко приводит к возрастанию машинного времени при минимизации погрешности $\bar{\Delta}'$ и не оказывает существенного влияния на идентификацию переходной составляющей. Изменение шага $t'_{\text{н}}$ вызывает менее интенсивное возрастание машинного времени, но дает более существенное увеличение погрешности $\bar{\Delta}'$.

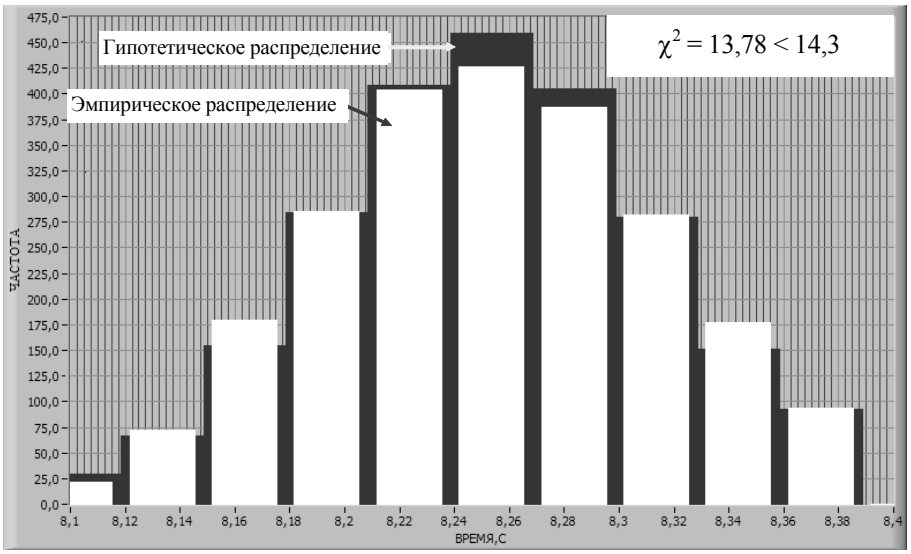


а

Рис. 1. Результаты исследования опыта гашения поля с разомкнутой обмоткой статора без гасительного сопротивления:
а – исходный переходный процесс



б



в

Рис. 1. Результаты исследования опыта гашения поля с разомкнутой обмоткой статора без гасительного сопротивления: *б* – гистограмма генеральной совокупности случайного признака; *в* – гистограмма выборки из генеральной совокупности

Таблица 1. **Результаты исследования и идентификации переходных процессов в опытах ГП мощной СМ ТТК-50-2УЗ-П, 50 МВт**

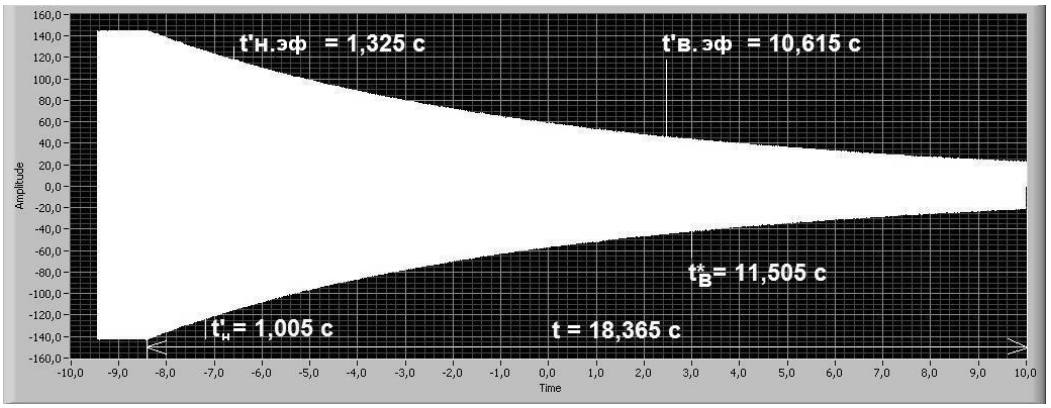
	Обмотка якоря разомкнута		Обмотка якоря замкнута	
	без $R_г$	с $R_г$	без $R_г$	с $R_г$
Результаты исследований				
Генеральная совокупность				
Объем $N_{исх}$ ($N_{ск}$)	431985 (429381)	62128 (61650)	4005 (3968)	378 (365)
МО $\tilde{\tau}'_{0\,исх}$ ($\tilde{\tau}'_{0\,ск}$), с	8,476031 (8,354936)	3,195539 (3,206505)	0,799664 (0,791977)	0,238865 (0,237178)
Дисперсия $\sigma^2_{0\,исх}$ ($\sigma^2_{0\,ск}$), $с^2$	10411,47 (0,1758)	81,948 (0,0995)	0,048271 (0,005104)	0,000211 (0,00012)
Размах случайного признака, %	148 (80)	208 (92)	300 (70)	46 (32)
Выборка из генеральной совокупности				
Объем $n_{исх}$ ($n_{ск}$)	3710 (3623)	1402 (1375)	350 (–)	102 (97)
МО $\tilde{\tau}'_{исх}$ ($\tilde{\tau}'_{ск}$), с	8,488265 (8,354915)	3,222154 (3,211220)	0,796078 (–)	0,238630 (0,237202)

Окончание табл. 1

	Обмотка якоря разомкнута		Обмотка якоря замкнута	
	без $R_г$	с $R_г$	без $R_г$	с $R_г$
Дисперсия $\sigma^2_{исх}$ ($\sigma^2_{ск}$), с^2	5,996 (0,0074)	0,05897 (0,02289)	0,00128 (–)	0,000078 (0,000039)
Размах случайного признака, %	154 (16)	86 (59)	43 (–)	21 (17)
Эффективная точечная выборка				
Объем $n_{эф}$	4	4	4	4
МО $\tilde{\tau}'_{эф}$, с	8,354930	3,143730	0,778703	0,225234
Дисперсия $\sigma^2_{эф}$, с^2	0,000274	0,000103	0,000011	0,00000037
Размах случайного признака, %	0,46	0,71	0,94	0,51
Результаты идентификации				
Переходная составляющая				
Диапазон ($t'_н - t'_в$), с	1,325–10,615	2,905–6,385	1,655–2,555	0,035–0,285
$\tilde{\tau}'_0$, с	8,354930	3,143730	0,778703	0,225234
$2U'_0$ ($2I'_0$), о.е.	264,99	261,497	0,822518	0,872909
$2U_\infty$ ($2I_\infty$), о.е.	17	17,4	0,023	0,047
$\bar{\Delta}'_U$ ($\bar{\Delta}'_I$), о.е.	$\bar{\Delta}'_{1051} = 0,348$	$\bar{\Delta}'_{751} = 0,966$	$\bar{\Delta}'_{351} = 0,002$	$\bar{\Delta}'_{121} = 0,006$
Сверхпереходная составляющая				
Диапазон ($t''_н - t''_в$), с	0,005–0,725	0,005–0,455	0,005–0,325	0,005–0,045
τ''_0, с	0,488084	0,386865	0,283232	0,022594
$2U''_0$ ($2I''_0$), о.е.	3,1213	11,671	0,051510	0,015930
Среднеквадратичное отклонение по всему процессу				
$\bar{\Delta}_U$ ($\bar{\Delta}_I$), о.е.	$\bar{\Delta}_{1151} = 0,363$	$\bar{\Delta}_{801} = 0,905$	$\bar{\Delta}_{401} = 0,002$	$\bar{\Delta}_{121} = 0,003$

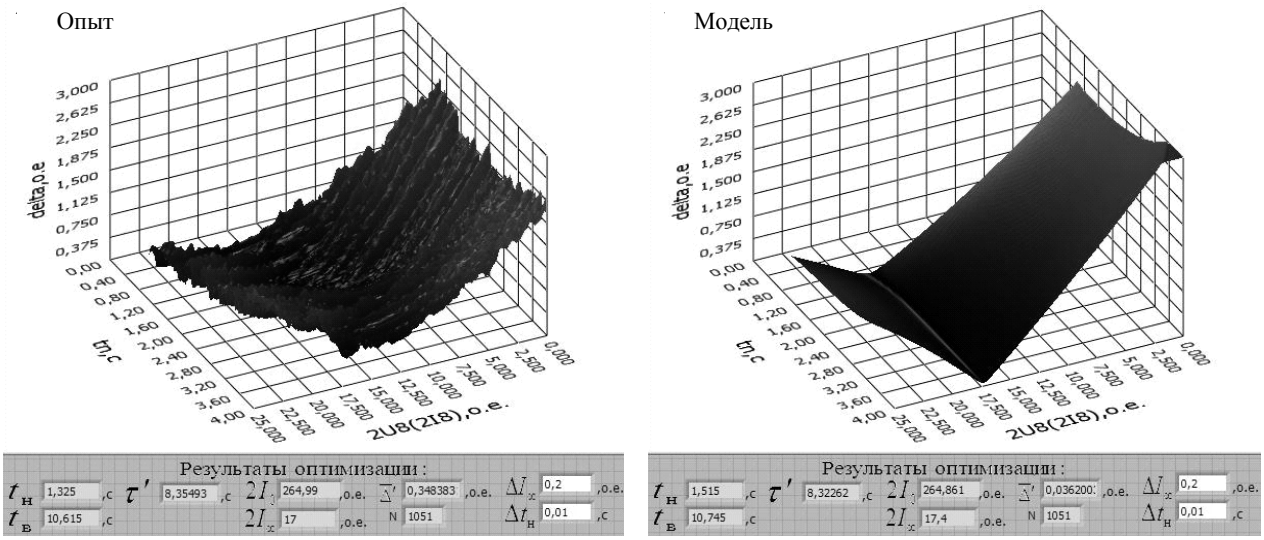
На рис. 2 и 3 представлены переходные процессы в опыте ГП с разомкнутой обмоткой якоря без гасительного сопротивления и с сопротивлением в цепях возбуждения СМ, а также погрешность приближения $\bar{\Delta}'$ в виде дискретной поверхности в трехмерном измерении. На рис. 4 и 5 представлена аналогичная информация, только с замкнутой обмоткой якоря СМ. Результаты идентификации переходной составляющей представлены в табл. 2. Параметры идентификации переходной составляющей, соответствующие наименьшей погрешности $\bar{\Delta}'$, используются для идентификации сверхпереходной составляющей по формулам (6). Результаты ее идентификации также приведены в табл. 2.

Благодаря разработанному способу минимизации среднеквадратичной погрешности приближения $\bar{\Delta}'$ для всех представленных с различной длительностью и степенью зашумленности переходных процессов с использованием оптимизации установившегося значения напряжения от остаточного намагничивания и одновременно нижней границы $t'_н$ в диапазоне $t'_н - t^*_в$, обеспечивается максимально возможная достоверность и точность по (7) результатов идентификации переходных процессов в опытах ГП любой длительности (табл. 2).



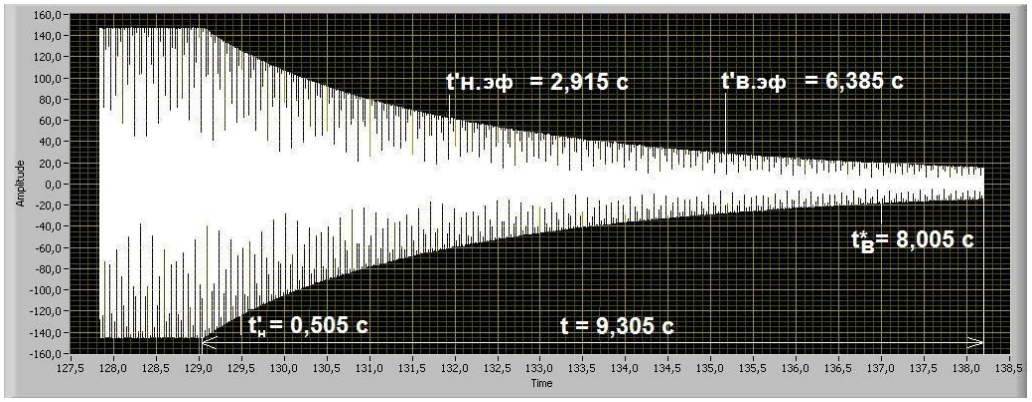
а

Рис. 2. Результаты оптимизации параметров опыта гашения поля с разомкнутой ОС без гасительного сопротивления:
а – исходный переходный процесс

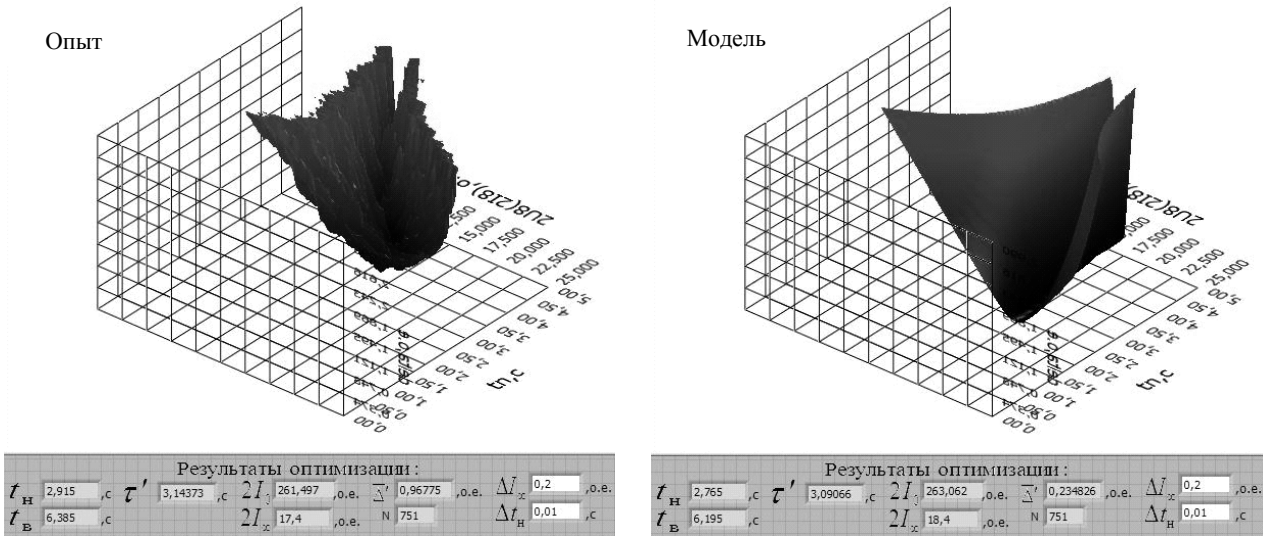


б *в*

Рис. 2. Результаты оптимизации параметров опыта гашения поля с разомкнутой ОС без гасительного сопротивления:
б – результаты оптимизации опыта; *в* – результаты оптимизации модели

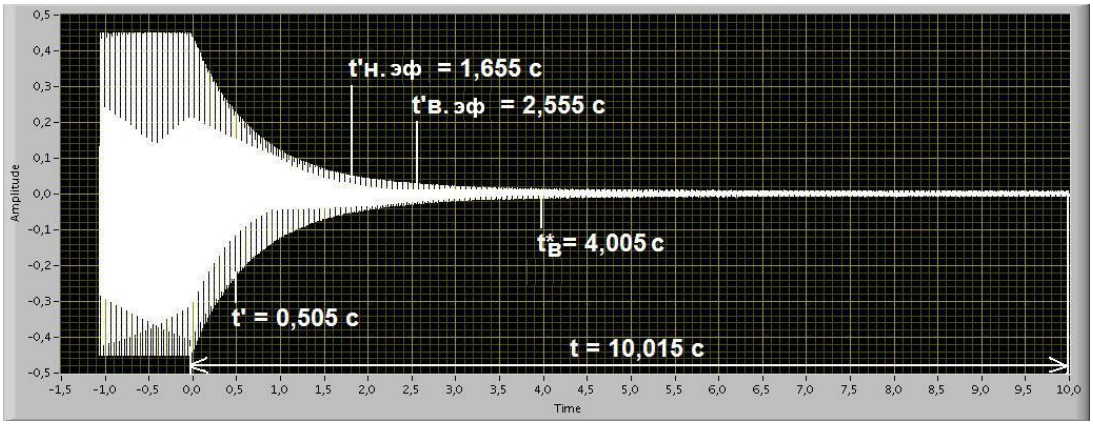


а

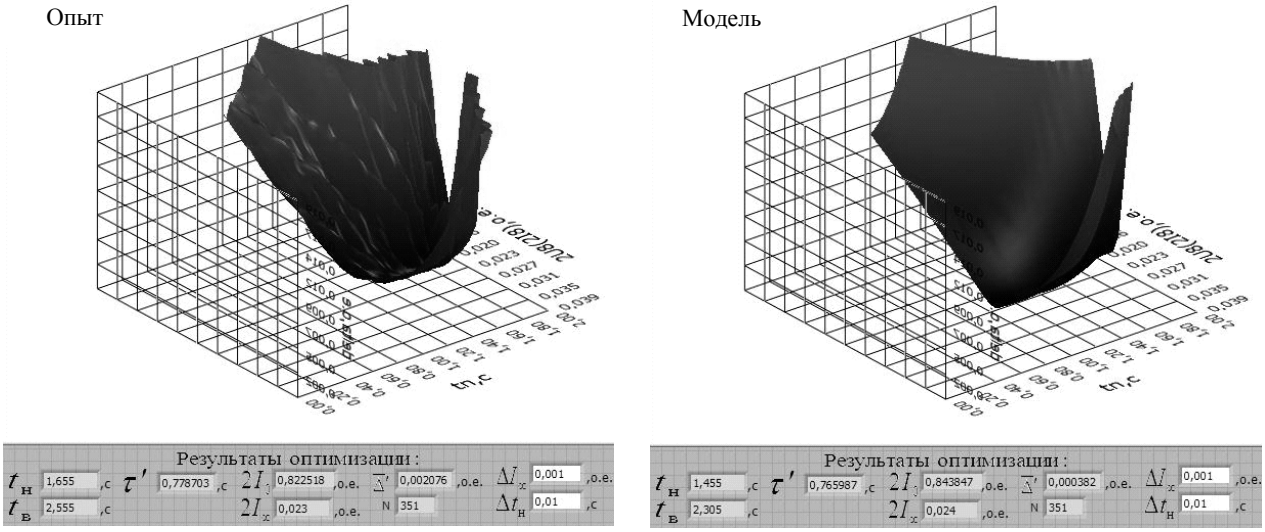


б *в*

Рис. 3. Результаты оптимизации параметров опыта гашения поля с разомкнутой ОС с гасительным сопротивлением:
а – исходный переходный процесс; *б* – результаты оптимизации опыта; *в* – результаты оптимизации модели

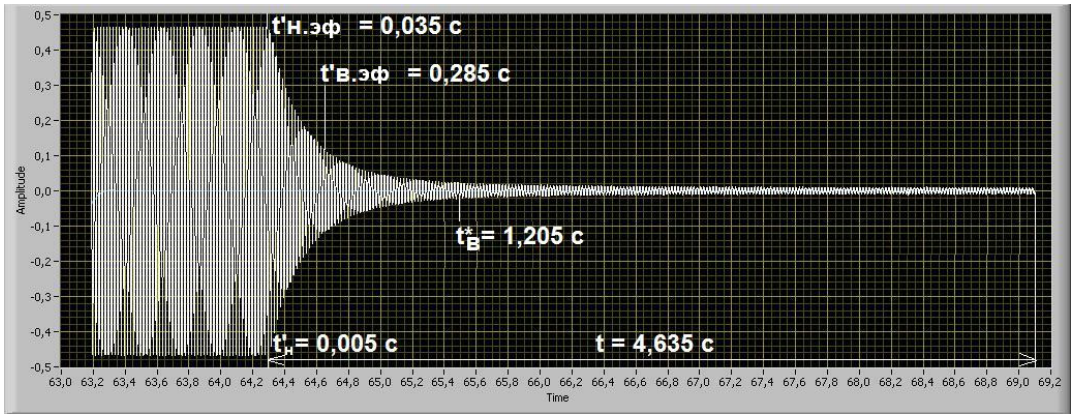


а



б *в*

Рис. 4. Результаты оптимизации параметров опыта гашения поля с замкнутой ОС без гасительного сопротивления:
а – исходный переходный процесс; *б* – результаты оптимизации опыта; *в* – результаты оптимизации модели



а

Рис. 5. Результаты оптимизации параметров опыта гашения поля с замкнутой ОС с гасительным сопротивлением:
а – исходный переходный процесс

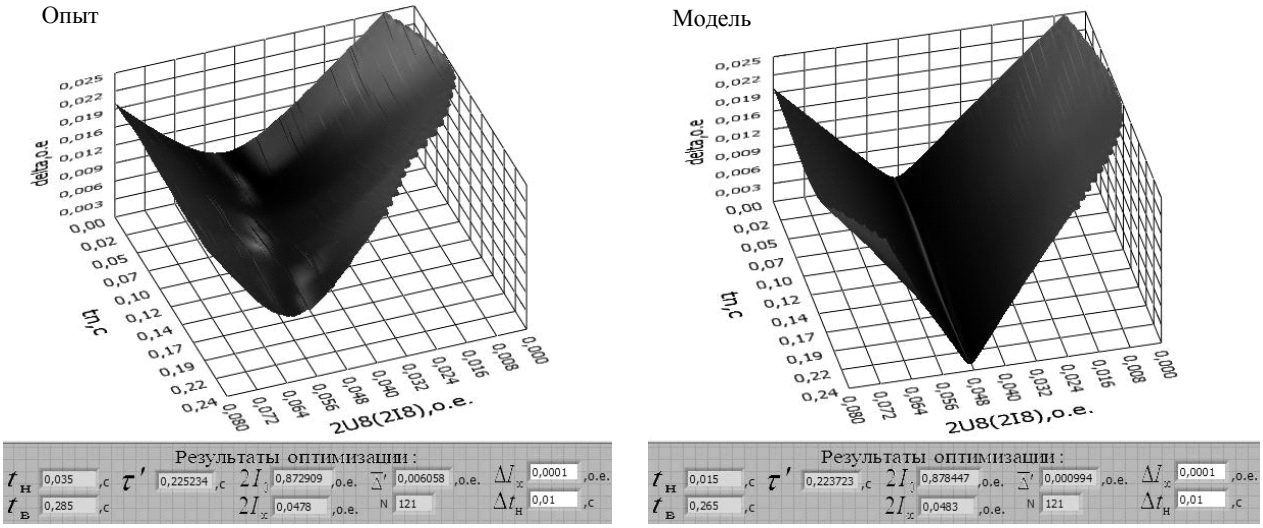


Рис. 5. Результаты оптимизации параметров опыта гашения поля с замкнутой ОС с гасительным сопротивлением: *б* – результаты оптимизации опыта; *в* – результаты оптимизации модели

Таблица 2. **Сравнительный анализ полученных результатов**

Уровень напряжения якоря до переходного процесса при $t = 0$		Уровень напряжения якоря по результатам идентификации при $t = 0$		Расхождение, %	
Обмотка якоря разомкнута					
без $R_г$	с $R_г$	без $R_г$	с $R_г$	без $R_г$	с $R_г$
285,95	290,09	285,12	290,57	0,29	0,16
Обмотка якоря замкнута					
без $R_г$	с $R_г$	без $R_г$	с $R_г$	без $R_г$	с $R_г$
0,899	0,933	0,897	0,936	0,22	0,32

Выводы

1. Идентификация переходных процессов СМ в опытах ГП независимо от длительности их протекания осуществляется с высокой точностью и достоверностью благодаря разработанному способу минимизации среднеквадратичной погрешности приближения $\overline{\Delta}'$ на участке переходного процесса с переходной составляющей.

2. Постоянные времени, полученные по напряжению или по току короткого замыкания якоря с использованием ВСМ, подтверждают их высокую достоверность и точность.

Библиографические ссылки

7. *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.

8. *Судаков А. И., Чабанов Е. А., Шулаков Н. В*. Вероятностно-статистические методы исследования переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. – 2010. – № 8. – С. 22–29.

9. *Судаков А. И., Чабанов Е. А., Шулаков Н. В.* Модернизация вероятностно-статистических методов исследования переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 20–26.

10. *Судаков А. И., Чабанов Е. А*. Исследования по идентификации 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.

* * *

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
S. V. Shutemov, Senior Lecturer, Perm National Research Polytechnic University

Developing the capacity of probabilistic and statistical methods of accurate identification of long transient processes during field suppression experiments of powerful synchronous machines

The article is devoted to the development of new approaches in the identification of long transient processes of powerful synchronous machines within the range of national standards of the Russian Federation on the results of bench tests using probabilistic and statistical methods (PSM). Objects of research in this are field suppression experiments, which are taking place under the influence of these processes on various random factors.

Keywords: synchronous machine, transient process, research, identification, time constant, mean square error

Получено: 07.11.13