

УДК 621.313

Шифр специальности ВАК 2.4.2., 2.4.3.

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ АДЕКВАТНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ НАЧАЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И ГАШЕНИЯ ПОЛЯ

Предложена методика выявления по данным СМПР некорректных параметров синхронных машин, предоставляемых субъектами электроэнергетики в диспетчерские центры и проектные организации. Методика основана на подаче измеренного напряжения возбуждения в модель машины и сравнении откликов напряжения статора и тока ротора в характерных переходных процессах начального возбуждения и гашения поля.



Машинный зал физической модели АО «НТЦ ЕЭС»

Фото: Кирилл Прохоров

АВТОР:

К.В. Прохоров, аспирант,
ORCID ID 0009-0008-5455-7193,
prokhorov-kv@ntcees.ru,
АО «НТЦ ЕЭС»

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

#энергосистема; #синхронная
машина; #синхронизированные
векторные измерения; #система
мониторинга; #математическая
модель; #оценка корректности
параметров модели

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:

Прохоров К.В. Методика проверки адекватности параметров синхронной машины по данным синхронизированных векторных измерений в переходных процессах начального возбуждения и гашения поля // Энергия единой сети. 2025. № 5-6. С. 38–43.

©©

ВВЕДЕНИЕ

С усложнением современных энергосистем и ростом средств автоматизированного управления возрастает потребность в разработке достоверных и верифицированных моделей основного оборудования. Согласно [1], владельцы генерирующих установок обязаны предоставлять параметры оборудования в адрес субъектов оперативно-диспетчерского управления. Эти параметры служат основой для построения и актуализации моделей, используемых при расчетах режимов и исследовании устойчивости энергосистем. Однако в настоящее время отсутствует универсальный и объективный инструмент, позволяющий проверять соответствие переданных параметров фактическим характеристикам оборудования.

Статья посвящена автоматизированной оценке адекватности динамических параметров синхронной машины, в частности индуктивностей и постоянных времени по оси d, на основе анализа переходных процессов начального возбуждения и гашения поля по данным синхронизированных измерений.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В переходных процессах начального возбуждения и гашения поля задействована только ось d синхронной машины, поэтому использовать уравнения оси q и механического движения ротора нет необходимости. Однако следует отметить, что в расчете необходимо использовать установившиеся параметры оси q для расчета коэффициента приведения единиц возбуждения.

Инициализация модели в условиях начального возбуждения осуществляется путем задания потокосцеплений равных нулю, а в случае гашения поля — по измеренным значениям напряжения статора U и частоты напряжения статора f , которая в относительных единицах равна угловой частоте ω . В модели синхронной машины целесообразно учитывать насыщение [2], поэтому в общем виде с учетом насыщения формулы инициализации модели можно записать следующим образом:

$$\omega_0 = f_0, \tag{1}$$

$$\psi_{ad0} = U_0 / \omega_0, \tag{2}$$

$$L_{ad0} = \frac{L_{ad}}{1 + m_d \psi_{ad0}^{nd}}, \tag{3}$$

$$i_{f0} = \frac{\psi_{ad0}}{L_{ad0}}, \tag{4}$$

$$\psi_{f0} = \psi_{ad0} + (L_f + L_c) \cdot i_{f0}, \tag{5}$$

$$\psi_{kdo} = \psi_{ad0}, \tag{6}$$

где i_f — ток возбуждения;
 ψ_{ad} — взаимное потокосцепление по оси d;
 ψ_{kd} — потокосцепление рассеяния эквивалентного демпферного контура по оси d;
 ψ_f — потокосцепление рассеяния обмотки возбуждения;
 L_{ad} — взаимная индуктивность по оси d;

L_f — индуктивность рассеяния обмотки возбуждения по оси d;

L_c — *Canau*-индуктивность;

md — первый коэффициент кривой насыщения по оси d;

nd — второй коэффициент кривой насыщения по оси d.

Исключив из классических дифференциальных уравнений синхронной машины [3], используемых для расчетов устойчивости энергосистем, уравнения оси q и слагаемые, связанные с током статора, который в рассматриваемых переходных процессах равен нулю, а также уравнения электромеханического движения ротора, можно получить систему уравнений (7) – (13).

$$\frac{d\psi_f}{dt} = R_f \cdot i_f - U_f, \tag{7}$$

$$\frac{d\psi_{kd}}{dt} = -R_{kd} \cdot i_{kd}, \tag{8}$$

$$\psi_{kd} = \left(\frac{L_{ad}}{1 + m_d \psi_{ad}^{nd}} + L_c + L_{kd} \right) \cdot i_{kd} + \left(\frac{L_{ad}}{1 + m_d \psi_{ad}^{nd}} + L_c \right) \cdot i_f, \tag{9}$$

$$\psi_f = \left(\frac{L_{ad}}{1 + m_d \psi_{ad}^{nd}} + L_c \right) \cdot i_{kd} + \left(\frac{L_{ad}}{1 + m_d \psi_{ad}^{nd}} + L_f + L_c \right) \cdot i_f, \tag{10}$$

$$\psi_{ad} = \frac{L_{ad}}{1 + m_d \psi_{ad}^{nd}} \cdot (i_f + i_{kd}), \tag{11}$$

$$\omega = f, \tag{12}$$

$$U = \omega \cdot \psi_{ad}, \tag{13}$$

где U_f — напряжение возбуждения;

R_f — активное сопротивление обмотки возбуждения;

R_{kd} — активное сопротивление эквивалентного демпферного контура;

L_{kd} — индуктивность рассеяния эквивалентного демпферного контура;

i_{kd} — ток эквивалентного демпферного контура.

Следует отметить, что в уравнении (7) необходимо использовать фактическое активное сопротивление обмотки возбуждения R_f с учетом теплового изменения.

Выполнив численное интегрирование во времени системы уравнений (7) – (13) с учетом передачи на вход модели сигналов напряжения возбуждения U_f и частоты f , можно получить необходимые для целей анализа выходные переменные модели i_f и U .

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ НАЧАЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И ГАШЕНИЯ ПОЛЯ

Для выполнения проверки адекватности модели используются следующие сигналы с рекомендуемым шагом дискретизации не более 20 мс:

- напряжение статора U ,
- ток статора I ,
- частота f ,
- ток возбуждения i_f ,
- напряжение возбуждения U_f .

Процедура начального возбуждения синхронных машин подразделяется на три хронологические фазы: фаза отсутствия возбуждения, переходная фаза и фаза установившегося режима. Продолжительность переходного процесса определяется алгоритмическими особенностями системы автоматического регулирования возбуждения и значением переходной постоянной времени по оси d холостого хода (T'_{d0}). Время нарастания возбуждения обычно находится в диапазоне от единиц до десятков секунд.

Алгоритм фиксации интервала начального возбуждения можно описать следующим образом. Сначала из потоковых либо архивных данных формируются последовательности сигналов напряжения U и тока I статора. Для этого используется скользящее окно продолжительностью N секунд с шагом сдвига в одну секунду. В преде-

лах каждого основного окна проводится предварительная обработка: устраняются выбросы и пропуски, при необходимости выполняется восстановление недостающих отсчетов аппроксимацией. Далее внутри основного окна запускается вспомогательное скользящее подокно длительностью две секунды и шагом в одну секунду. Оно используется для определения участка отсутствия возбуждения. Такой участок фиксируется при выполнении условий:

- на первой секунде усредненные значения напряжения и тока статора не превышают 5 % от своего номинального значения;
- на второй секунде напряжение статора находится в пределах 5–50 % номинального значения, при этом усредненный ток остается меньше 5 %.

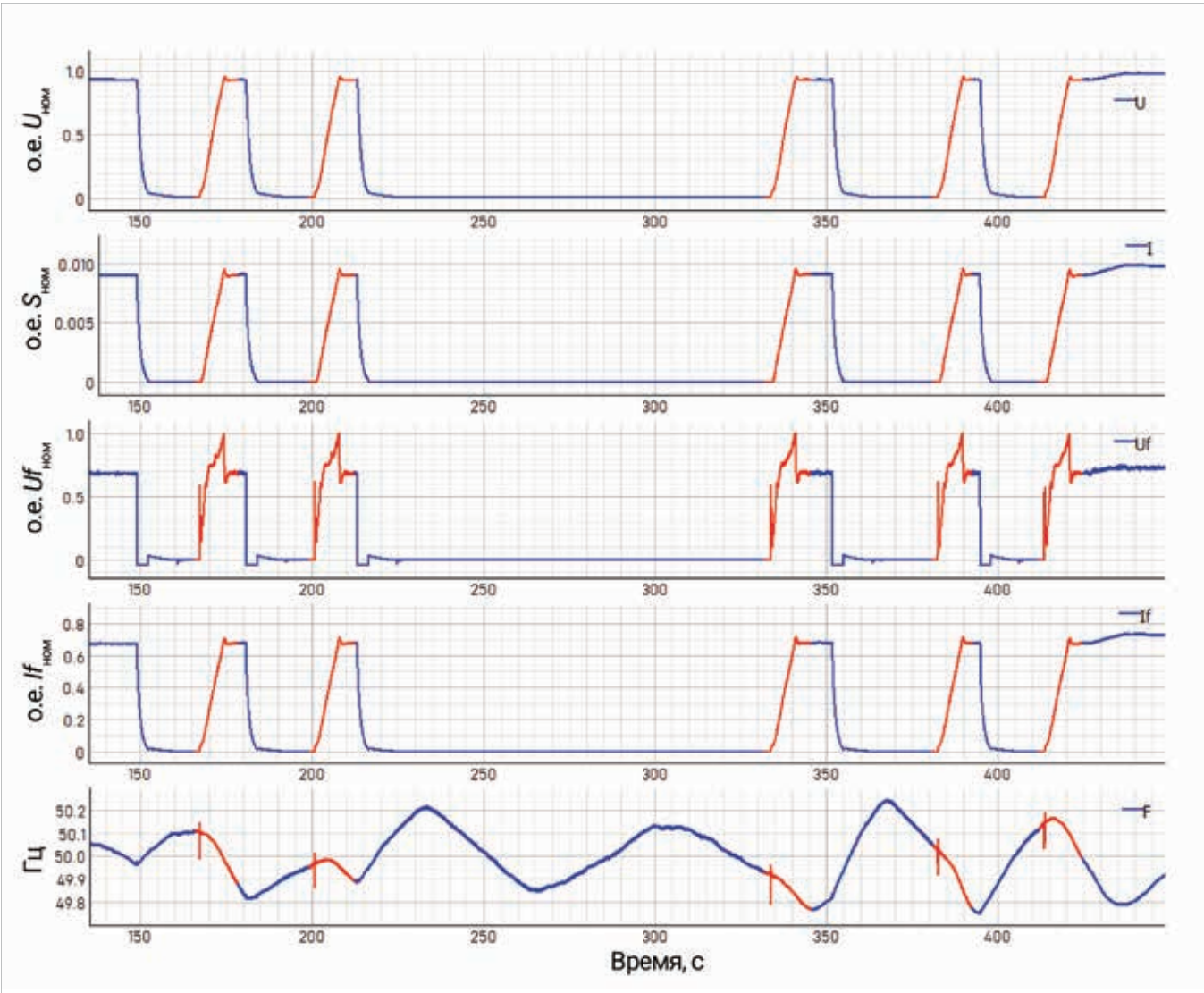


Рис. 1. Выявление интервалов начального возбуждения (выделены красным цветом) по натурным данным СВИ Волжской ГЭС ГА-12

Эти условия введены для того, чтобы отсеять ситуации, когда напряжение быстро исчезает и так же быстро восстанавливается из-за возможной потери данных СВИ. Граничная величина в 5 % отсутствия напряжения и тока статора обусловлена необходимостью отстройки от остаточного напряжения, возможных потерь холостого хода блочного трансформатора, а также погрешностей измерений вблизи нулевого уровня.

Если интервал отсутствия возбуждения обнаружен, алгоритм продолжает поиск интервала установившегося возбуждения также длиной две секунды. Поиск начинается сразу после найденного участка отсутствия возбуждения и осуществляется пошагово с шагом в одну секунду, но не более чем в пределах 30 секунд. Участок считается участком установившегося возбуждения, если выполняются условия:

- средний ток статора на интервале в две секунды меньше 5 % номинального значения;
- среднее напряжение статора превышает 70 % номинального значения;
- изменение напряжения статора за интервал должно быть несущественным, что проверяется условием:

$$|\bar{U}_1 - \bar{U}_2| < 0,005 U_{\text{ном}}, \quad (12)$$

где $\bar{U}_1, \bar{U}_2$ – усредненные значения напряжения статора на первой и второй секундах интервала.

Фиксация интервала установившегося возбуждения позволяет далее оценить тепловое изменение активного сопротивления обмотки возбуждения относительно номинального значения по известному соотношению U_f/I_f .

При успешном выполнении всех условий промежуток времени от начала отсутствия возбуждения до окончания установившегося возбуждения определяется как событие начала возбуждения.

Продолжительность основного окна анализа обычно принимается равным 40 секунд при работе с потоковыми данными СВИ в условиях реального процесса. При обработке архивных осциллограмм окно может быть равно их длительности. На рис. 1 представлен пример применения метода к серии событий возбуждения и гашения поля гидроагрегата ГА-12 Волжской ГЭС.

Процесс гашения поля синхронной машины обратен процессу начального возбуждения. На рис. 2 представ-

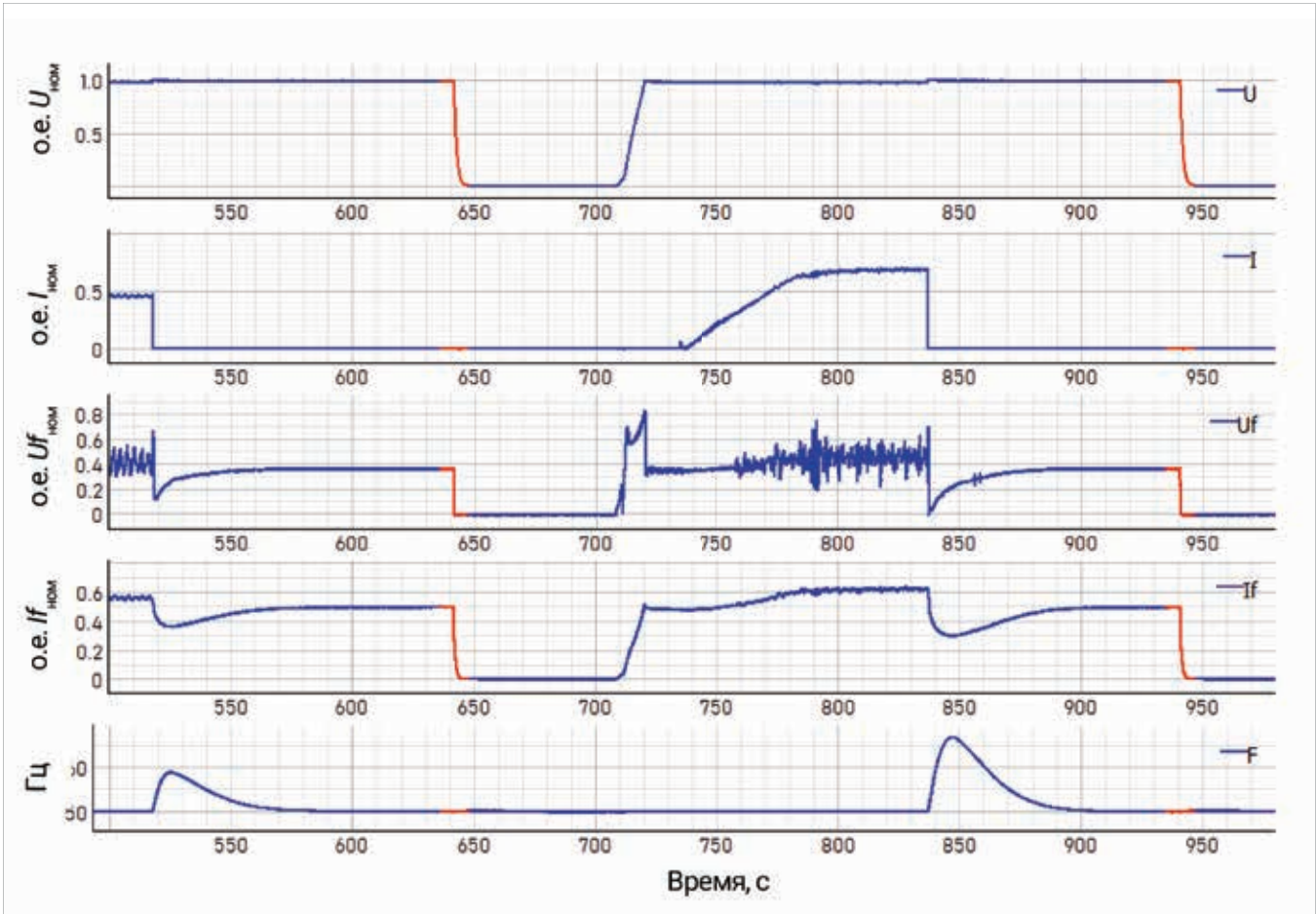


Рис. 2. Выявление интервалов гашения поля (выделены красным цветом) по натурным данным СВИ Богучанской ГЭС ГА-4

Параметры исследуемого гидрогенератора № 2 Новосибирской ГЭС

Обозначение	Ед. изм.	Модель 1 (некорректная)	Модель 2 (корректная)
$U_{ном}$	кВ	13,8	13,8
$S_{ном}$	МВА	76,5	76,5
$\cos \varphi_{ном}$	-	0,915	0,915
$U_{гном}$	В	400	284
$I_{гном}$	А	1700	1530
L_d	о.е.	0,755	0,89
L'_d	о.е.	0,308	0,308
L''_d	о.е.	0,214	0,18
T'_{d0}	с	4,36	4,1
T''_{d0}	с	0,102	0,04
L_q	о.е.	0,527	0,6
L_l	о.е.	0,1733	0,17
R_a	о.е.	0,005	0,005
md	-	0	0,1
nd	-	0	8
mq	-	0	0,1
nq	-	0	10

лена работа алгоритма поиска гашения поля на примере Богучанской ГЭС ГА-4.

Важно отметить, что если в событиях гашения поля напряжение возбуждения принимает отрицательные значения, как, например, в тиристорных системах возбуждения, то необходимо убедиться, что измерительное оборудование охватывает диапазон отрицательных величин. Вместе с тем при наличии в системе возбуждения автомата гашения поля измерения параметров следует проводить после данного устройства, чтобы получать релевантные данные.

После успешной идентификации событий начального возбуждения или гашения поля выполняется последовательность операций для проверки адекватности модели:

- 1) расчет внутренних параметров схемы замещения машины;
- 2) определение коэффициента пересчета единиц возбуждения;
- 3) определение температурной коррекции активного сопротивления по интервалу наличия установившегося возбуждения;
- 4) инициализация переменных состояния модели;
- 5) интегрирование модели путем подачи на вход фактического напряжения возбуждения в диапазоне

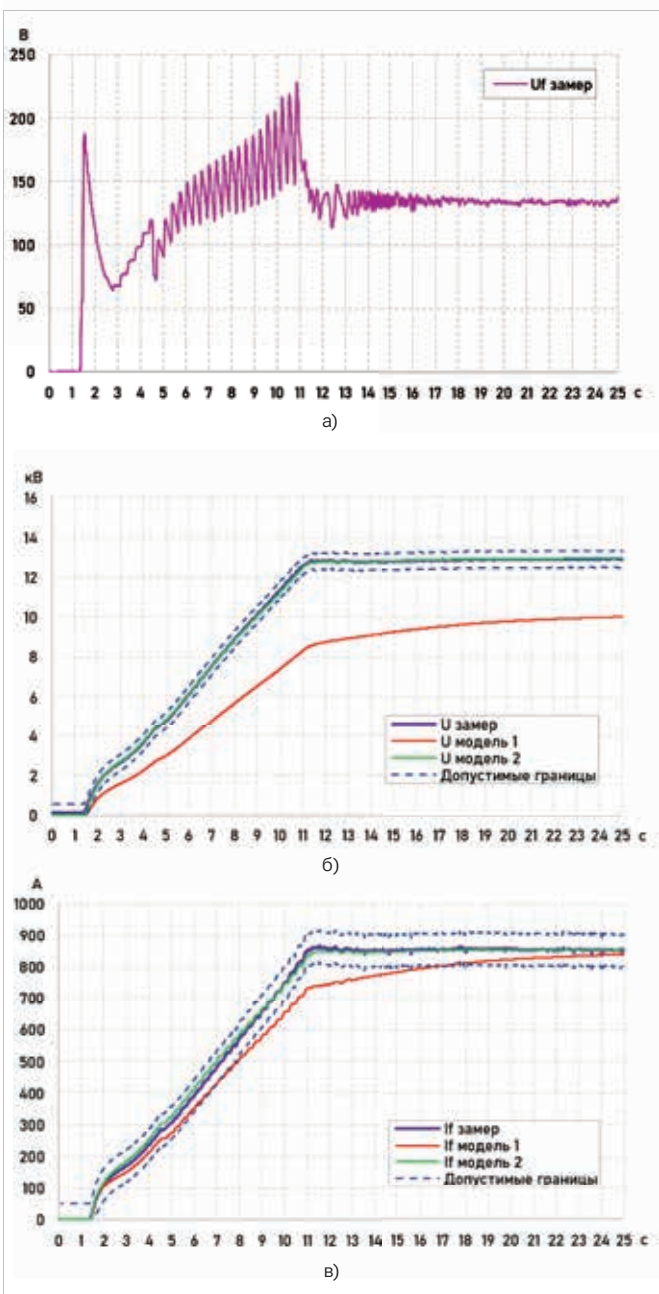


Рис. 3. Проверка модели в событии начального возбуждения

- времени между интервалом отсутствия возбуждения и интервалом установившегося наличия возбуждения;
- 6) сравнение переменных напряжения статора и тока ротора модели и соответствующих измерений реальной синхронной машины. Условием адекватности модели считается непревышение отклонения заданных пороговых значений отклонений с учетом допустимого смещения по времени.

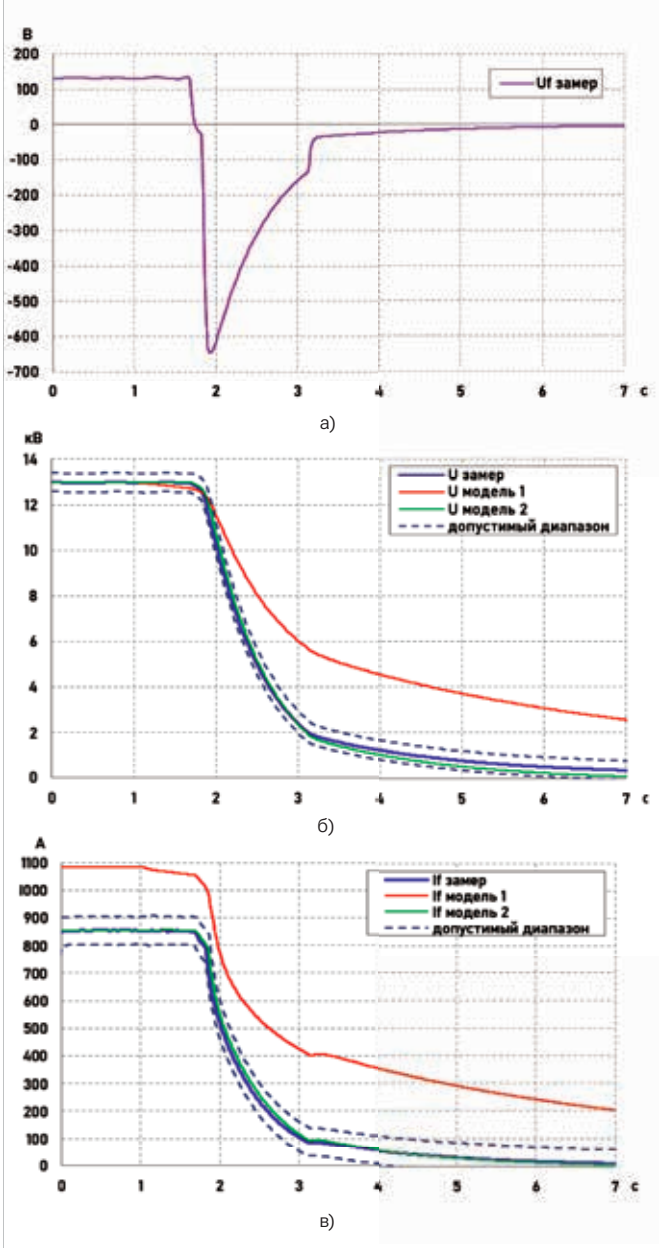


Рис. 4. Проверка модели в событии гашения поля

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Разработанная методика была реализована в специальном программном обеспечении. В качестве критериев корректности модели приняты следующие допустимые границы: отклонения напряжения статора и тока ротора в модели должны быть менее 3 % номинального значения с учетом допустимого смещения ± 60 мс. Проверка выполнена на основе данных синхронизированных векторных измерений, полученных на гидрогенераторе

№ 2 Новосибирской ГЭС типа СВ 1343/140–96. В таблице 1 представлены два набора параметров модели генератора — корректные и некорректные по условиям принятых критериев оценки.

На рис. 3 показан пример проверки модели в характерном событии начального возбуждения, а на рис. 4 — в событии гашения поля. Начало численного интегрирования соответствует моменту времени $t = 1$ с. Согласно представленным результатам, модель 2 соответствует принятым критериям корректности, в то время как модель 1 этим требованиям не удовлетворяет — кривые напряжения статора и тока ротора отклоняются за допустимые границы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и апробирована методика проверки адекватности параметров синхронной машины на основе анализа синхронизированных векторных измерений в переходных процессах начального возбуждения и гашения поля. Разработанный методический подход реализован в виде специализированного программного обеспечения.

В качестве критериев соответствия математической модели реальному объекту приняты граничные отклонения напряжения статора и тока возбуждения с учетом допустимого смещения по времени. Представленное решение обеспечивает возможность автоматизированной обработки измерительных данных и может быть интегрировано в системы мониторинга для непрерывного анализа в условиях протекания реального технологического процесса.

Приведенные результаты на примере реальных данных подтверждают эффективность предложенного подхода для оперативной проверки предоставляемых параметров синхронных машин на основе эксплуатационных измерений.

Рисунки к статье предоставлены автором.

↓ ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 20.12.2022 № 1340 «Об утверждении правил предоставления информации, необходимой для осуществления оперативно-диспетчерского	управления в электроэнергетике».
2. Shackshaft G. and Henser P.B. Model of generator saturation for use in power system studies. Proc. IEE. 1979. Vol. 126. No 8. P. 759-763.	
3. Eurostag 5.2, Theory Manual, Tractebel, 2018.	