

УДК 621.31

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ВИБРОАКТИВНОСТЬ СИНХРОННОГО ТУРБОДВИГАТЕЛЯ

Полищук Владимир Иосифович<sup>1</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

Герасимов Николай Владимирович<sup>2</sup>,  
nvgerasimov@yandex.ru

Крицкий Михаил Викторович<sup>2</sup>,  
nurochka18@yandex.ru

Глазырин Александр Савельевич<sup>3</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет,  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

<sup>2</sup> ОДС Самарского РДУ АО «СО ЕЭС»,  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Полевая, 5.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Мощные высоковольтные синхронные электродвигатели с неявнополюсным ротором серии СТД и СТДП являются одними из главных элементов системы сбора нефти и поддержания пластового давления, к которым предъявляются повышенные требования по эксплуатационной надежности. Вибросостояние при этом выступает одним из ключевых параметров, контролируемых в процессе эксплуатации. Источники вибрации имеют как механическую, так и электрическую природу возникновения. Общепринято считать, что замыкание малого количества витков в обмотке возбуждения приводит к незначительному изменению симметрии магнитного тяжения, и из-за того, что витковое замыкание может носить слабовыраженный (перемежающийся) характер, существуя в машине длительное время, оно не оказывает критического влияния на режим работы машины. Проверка на данный вид повреждений выполняется, как правило, только при проведении капитального ремонта двигателя. При эксплуатации двигателя возникает ряд дополнительных побочных негативных явлений, вызываемых витковыми замыканиями в обмотке возбуждения, например, таких как повышенный износ подшипников и резкое снижение ресурса масла из-за возникающих поперечных паразитных токов. В статье анализируется степень влияния электрического повреждения на виброактивность синхронных турбодвигателей.

**Цель:** оценить степень влияния электрического повреждения в обмотке возбуждения синхронного турбодвигателя на его виброактивность.

**Методы.** Для оценки степени влияния электрического повреждения в обмотке возбуждения синхронного турбодвигателя использовались расчетные методы, принятые в теории электрических машин.

**Результаты.** Установлено, что витковые замыкания в обмотке ротора вызывают изменение уровня вибрации не столько вследствие изменения магнитного тяжения, сколько из-за неравномерности нагрева бочки ротора. На изменение виброактивности влияет даже незначительная разница температур. Рекомендовано при изменении виброактивности синхронного турбодвигателя проводить тщательную проверку машины на предмет возникновения электрического повреждения в обмотке возбуждения.

### Ключевые слова:

Синхронный турбодвигатель, витковое замыкание, вибрация, обмотка возбуждения, техническое состояние.

### Введение

Синхронные турбодвигатели широко используются в нефтегазовой отрасли в качестве мощных ответственных электроприводов компрессоров, газовых нагнетателей, воздуходувок, насосов сбора нефти и поддержания пластового давления, к таким электроприводам предъявляются высокие требования по эксплуатационной надежности [1]. Требования эксплуатации синхронных двигателей (СД) определяют необходимость обязательного контроля их технического состояния с целью предотвращения ненормальных режимов и повреждений [2, 3]. Особое место занимает контроль вибрационного состояния ротора синхронных машин,

что вызвано разрушительными последствиями повышенной вибрации на машину. Применяемые в типовых схемах КНС (БКНС) синхронные турбодвигатели трехфазного тока частотой 50 Гц типа СТДП-6300-2-У4, СТДП-8000-2-У4, СТДП-10000-2-У4, СТДП-12500-2-У4 имеют частоту вращения 3000 об/мин, десятки мегаватт мощности и тем не менее системы диагностики от электрических повреждений в обмотке ротора, влияющих на его виброактивность, для них не разрабатываются. В настоящее время такие исследования ведутся в основном для крупных турбогенераторов [4–11]. Это связано с установившимся мнением, что у синхронных машин мощностью менее

100 МВт витковое замыкание (ВЗ) малого количества витков обмотки ротора не может вызвать сильного нарушения симметрии магнитного тяжения и существенно повлиять на виброактивность машины [12].

В то же время в условиях эксплуатации, при возникновении электрических дефектов, влияющих на виброактивность, например виткового замыкания (ВЗ) в обмотке возбуждения СД, крайне сложно эффективно снизить уровень вибрации [13].

Поскольку первопричины возникающей вибрации могут быть как механические, так и электрические, потребуются различные стратегии снижения уровня вибрации до нормативных значений [2, 13].

Наиболее изучены механические электромагнитные причины возникновения вибрации СД и методы ее устранения [14–16]. Существующие способы улучшения вибрационного состояния в основном связаны с балансировкой вращающейся части электрической машины.

#### Постановка задачи

Необходимо проанализировать, какими факторами, помимо нарушения магнитного тяжения, ВЗ влияет на изменение виброактивности СД.

#### Влияние на вибрацию неравномерности нагрева бочки ротора током возбуждения

Очевидно, что на уровень вибрации СД при ВЗ в обмотке ротора должен существенно повлиять прогиб ротора вследствие возникновения теплового дисбаланса бочки ротора. Источников теплового дисбаланса из-за ВЗ в обмотке ротора несколько. В первую очередь причиной возникновения теплового дисбаланса бочки ротора является неодинаковое количество тепла, выделяющееся в обмотках полюсов, имеющих разное количество витков [17, 18]. Разницу между количеством выделившегося тепла в целом и поврежденном полюсе двухполюсной машины можно довольно точно определить по формуле на основе закона Джоуля-Ленца:

$$\Delta Q = \frac{w_k}{w} \cdot I_f^2 \cdot R \cdot t,$$

где  $w$  – общее количество витков в обмотке ротора;  $w_k$  – количество замкнутых витков;  $I_f$  – ток возбуждения ротора, А;  $R$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;  $t$  – время, с.

Так как оба полюса находятся в одинаковых условиях охлаждения, неравномерное выделение тепла в полюсах приводит к разности температур между обмотками полюсов и к прогибу бочки ротора.

Величина прогиба в случае, когда точки с различным нагревом расположены на противоположных частях бочки ротора, изготавливаемой из высоколегированной стали марок: ОХНЗМ, ОХН4МАР, 35ХНЗМА, 35ХН1МФА, 35ХНМ, 36ХНМА, 36ХНЗМФА, 36ХН1Н, приближенно может быть подсчитана по формуле:

$$\lambda = \frac{(t_2 - t_1) \cdot \alpha \cdot l^2}{8d},$$

где  $t_2 - t_1$  – разность температур, °С;  $l$  – длина ротора, м;  $d$  – диаметр вала, м;  $\alpha = 11,7 \cdot 10^{-6}$  – коэффициент линейного удлинения для стали 35ХНМ, град<sup>-1</sup> [19].

Например, для турбодвигателя типа СТДП-8000–2–У4 при разности температур в диаметрально противоположных точках поверхности бочки ротора 1 °С деформация будет равна:

$$\lambda = \frac{11,7 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5^2}{8 \cdot 0,48} = 0,0000372 \text{ м.}$$

Если считать, что среднее перемещение всей массы ротора составляет 0,5λ, при массе ротора 4,52 т возникает неуравновешенность, приведенная к окружности бочки ротора ( $R=0,24$  м), равная:

$$\Delta M = \frac{0,0000372 \cdot 4520}{2 \cdot 0,24} = 0,3503 \text{ кг.}$$

При номинальной скорости вращения  $N=3000$  об/мин величина центробежной силы  $F_{\text{цн}}$  в данном случае достигает величины:

$$F_{\text{цн}} = \frac{(\pi \cdot N / 30)^2 \cdot R \cdot \Delta M}{g} = \frac{(3,14 \cdot 3000 / 30)^2 \cdot 0,24 \cdot 0,3503}{9,81} = 845,8 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Для данного типа машин достижение неуравновешенной центробежной силой значения 30 % веса ротора является предельно допустимой величиной, за которой может последовать разрушение машины. В нашем случае величина  $F_{\text{цн}}$  составила 18,7 %, что более чем существенно. Из этого следует, что разность температур (2...3 °С) в диаметрально противоположных точках поверхности бочки ротора может вызвать вибрацию, значительно превышающую 50 мкм, нормированное ГОСТ 20815 и ПТЭ ЭП значение [20]. Необходимо учитывать, что изменение вибрации будет носить режимный характер, вследствие зависимости от тока возбуждения и из-за тепловой инерции бочки ротора. Само ее изменение будет происходить не сразу после изменения тока возбуждения, а постепенно, следуя за изменением теплового состояния бочки ротора.

#### Влияние на тепловую деформацию ротора искажения распределения индукции под полюсами

Для облегчения анализа возникающих процессов было принято, что в закороченных витках одновременно протекают два тока: ток возбуждения СД и встречный ток такой же величины.

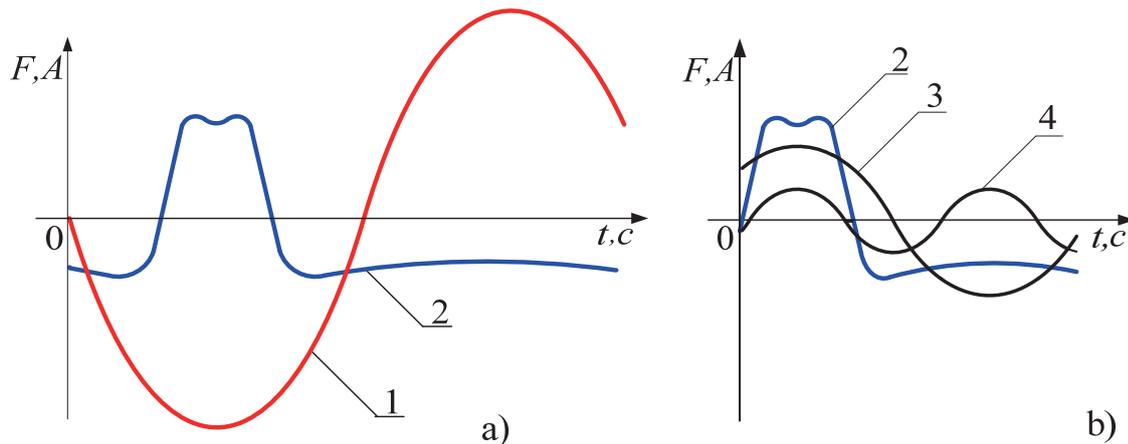
Индукция в зазоре при этом будет определяться:

- нормальной составляющей, обуславливаемой всей обмоткой возбуждения и протекающим по ней током, которую с достаточной для практи-

ки точно можно принять синусоидальной (кривая 1, рис. 1, а);

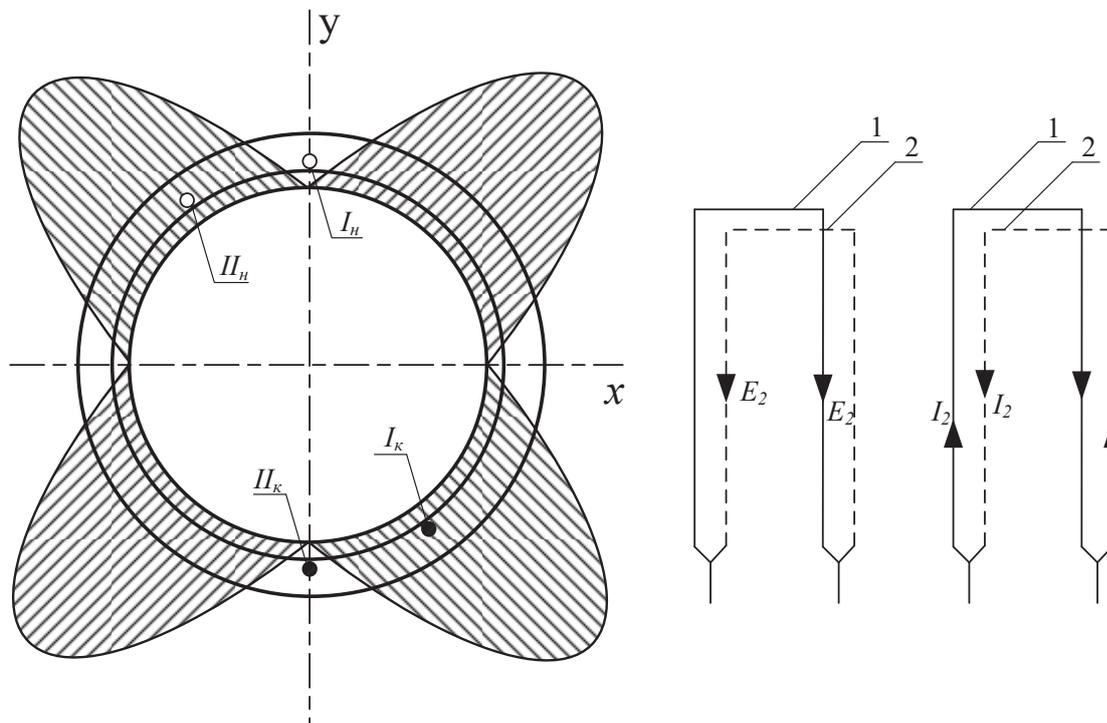
- составляющей от протекания в замкнутых витках встречного тока (кривая 2, рис. 1, а).
- Составляющая от встречного тока кривая 2 (рис. 1, б) является несинусоидальной пространственной кривой, которую можно разложить на синусоидальные гармонические составляющие. Главными составляющими будут являться гармоники основной – кривая 3 (рис. 1, б) и двойной – кривая 4 (рис. 1, б) частоты. Гармоника двойной частоты оказывает основное влияние на рассматриваемые тепловые процессы.

Гармоническая составляющая двойной частоты, вращаясь в пространстве со скоростью вращения основного поля статора, будет индуцировать в обмотках статора ЭДС с частотой  $f_2=2f_0$  (где  $f_0$  – номинальная частота СД). Чередование фаз этой ЭДС будет обратным чередованию фаз ЭДС, индуцированной основным полем, поскольку для основной гармоники сдвиг между фазами  $A_1$  и  $B_1$  составляет  $120^\circ$ , между фазами  $A_1$  и  $C_1$  –  $240^\circ$ ; для второй гармоники сдвиг между фазами  $A_2$  и  $B_2$  равен  $120^\circ \cdot 2=240^\circ$ , между фазами  $A_2$  и  $C_2$  –  $240^\circ \cdot 2=480^\circ$ , что соответствует  $480^\circ - 360^\circ = 120^\circ$ , то есть фазы  $B_2$  и



**Рис. 1.** График МДС обмотки возбуждения с замкнутым витком (а) и спектральный анализ МДС от обратного тока (б): 1 – кривая МДС от прямого тока; 2 – кривая МДС от обратного тока; 3 – основная гармоническая; 4 – удвоенная гармоническая

**Fig. 1.** Graph of magnetic driving force of winding rotor with turn-to-turn short-circuits (a) and inverse amperage frequency analysis (b): 1 is the forward amperage; 2 is the inverse amperage; 3 is the base frequency; 4 is the double frequency



**Рис. 2.** Схема появления уравнивающих токов в параллельных цепях: 1 – первая ветвь; 2 – вторая ветвь

**Fig. 2.** Scheme of occurrence of equalising currents in shunt circuits: 1 is the first conductor; 2 is the parallel conductor

$C_2$  относительно  $B_1$  и  $C_1$  меняются местами, что равносильно изменению чередования фаз на обратное.

Индуктированные ЭДС  $E_2$  в каждом витке имеют противоположные направления, поэтому в параллельных цепях обмоток, имеющих сокращенный шаг и параллельные ветви (рис. 2), возникнут уравнительные токи с частотой  $f_2=2f_0$ .

Величина уравнительных токов будет определяться амплитудой ЭДС второй гармонической и величиной реактивного сопротивления для уравнительных токов.

Амплитуда ЭДС зависит от несимметрии кривой индукции, создаваемой обратным током, и определяется количеством замкнутых витков, их местоположением относительно большого зуба на роторе и величиной тока возбуждения.

Индуктивные сопротивления  $x_1$  так же, как и сопротивление обратной последовательности  $x_2$ , зависит главным образом от индуктивности рассеяния статора.

#### Влияние на тепловой дисбаланс ротора уравнительных токов в параллельных ветвях обмотки статора при ВЗ в обмотке ротора

ВЗ в обмотке ротора вызывает искажение распределения индукции под полюсами. Уравнительные токи, если они синусоидальны, создают четырехполюсную МДС, вращающуюся против направления чередования фаз уравнительных токов, то есть по направлению вращения ротора, со скоростью, соответствующей скорости вращения ротора ( $f_y=2f_0$  и  $p_y=2p=4$ , где  $p$  – число пар полюсов генератора,  $p_y$  – число пар полюсов для МДС). Особенностью этой МДС является то, что при ее вращении происходит изменение, как амплитуд полуволн, так и их полюсных делений. Кривую МДС можно разложить на следующие составляющие: основную гармонику с частотой  $f=f_y$  и пульсирующие гармоники с частотой  $f_y$  (вторую, третью и т. д.).

Пульсирующие гармоники можно заменить двумя синусоидальными составляющими с половинной амплитудой, которые вращаются относительно основной гармоники в разные стороны со скоростями, соответствующими

$$n_v = \pm \frac{n_o}{v},$$

где  $n_y$  – скорость вращения основной гармоники;  $v$  – порядок гармоники (знак «+» соответствует прямому полю, знак «-» соответствует обратному полю).

Таким образом, для второй гармоники скорости вращения (для  $n=3000$  об/мин) будут:

- для прямого поля

$$n_2' = n + \frac{n}{2} = 3000 + \frac{3000}{2} = 4500 \text{ об / мин};$$

- для обратного поля

$$n_2'' = n - \frac{n}{2} = 3000 - \frac{3000}{2} = 1500 \text{ об / мин}.$$

Относительно вращающегося ротора в обоих случаях будет одинаковая скорость вращения 1500 об/мин, что для второй гармоники четырехполюсного поля соответствует  $2p=8$  и частоте индуктированных в роторе токов, равной 100 Гц.

Если уравнительные токи несинусоидальны, то картина значительно усложнится, но процесс останется аналогичным рассмотренному. Разложения необходимо будет выполнить для каждой гармонической составляющей уравнительного тока.

Определить потери в роторе, вызываемые уравнительными токами в параллельных цепях обмотки статора, расчетом невозможно, так как активные и реактивные сопротивления для токов, индуктированных в бочке ротора и других его контурах, представляют собой переменные нелинейные величины, зависящие от частоты и величины индукции вращающегося поля, а также от величины индукции постоянного результирующего магнитного потока машины в стали бочки; эта индукция является также переменной величиной по окружности бочки ротора. Поэтому ограничимся лишь качественным анализом явлений.

Частота переменных магнитных потоков, вызванных наличием короткозамкнутых витков в обмотке ротора, по отношению к последнему велика, поэтому глубина проникновения потока будет небольшой, порядка нескольких миллиметров. Индуктированная в обмотке ротора ЭДС за счет демпфирующего действия массивной бочки и демпферной системы ротора будет при этом незначительной.

Действие МДС, уравнительных токов на ротор аналогично действию МДС от токов обратного следования фаз, и поэтому все положения о реактивности обратного следования можно распространить и на реактивность уравнительных токов.

Как известно, индуктивное сопротивление обратной последовательности  $x_2$  может быть выражено уравнением

$$x_2 = x_s + x_s'\theta,$$

где  $x_s$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;  $x_s$  – некоторое эквивалентное индуктивное сопротивление ротора.

Короткозамкнутые витки в обмотке ротора можно рассматривать как несимметричную демпферную систему, влияние которой на двух- и четырехполюсные магнитные поля, вращающиеся относительно ротора, показано на рис. 3.

При наложении МДС поля, вращающегося относительно ротора, на весьма значительную МДС, создающую внутренний магнитный поток СД, распределение потерь по окружности бочки ротора изменится.

Наложение МДС в области больших насыщений вызывает значительно меньшие колебания индукции, а значит и меньшие потери, чем в области малых насыщений.

Положение короткозамкнутых витков относительно максимума индукции  $B_i$  будет определять их влияние на степень неравномерности нагрева ротора.

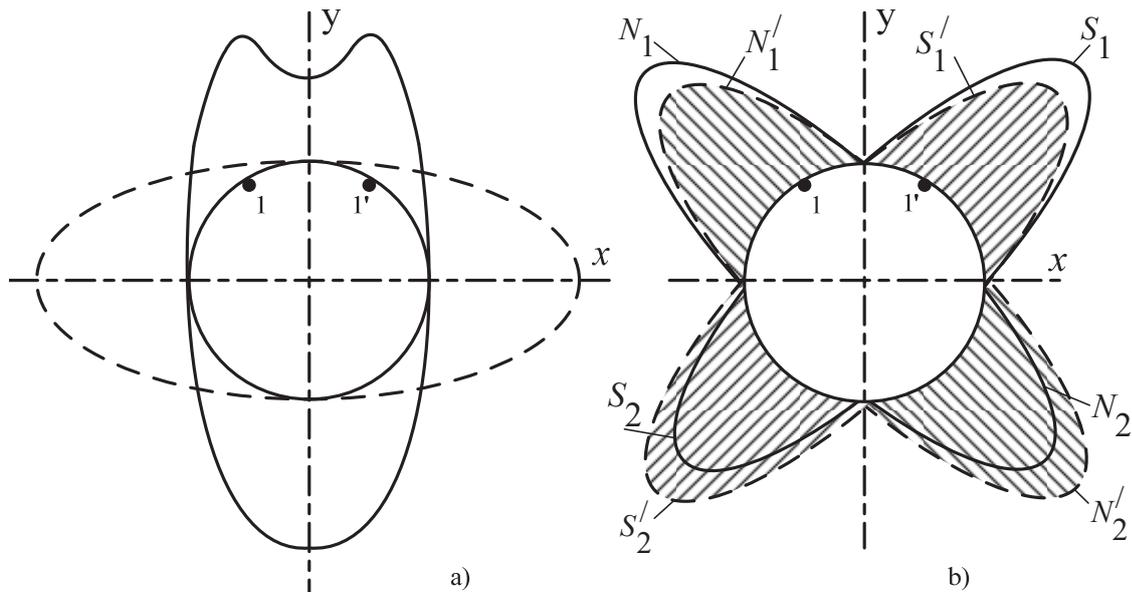
На рис. 4 показана векторная диаграмма СД, из которой следует, что степень влияния короткозамкнутых витков зависит от угла между осью полюсов ( $\Phi_0$ ) и осью внутреннего потока генератора ( $\Phi_i$ ), т. е. от угла  $\psi-\gamma$ .

**Влияние на вибрацию ротора  
 виткового замыкания в обмотке возбуждения**

Чем ближе расположены короткозамкнутые витки обмотки ротора к поверхности паза, тем больше их влияние на неравномерность нагрева

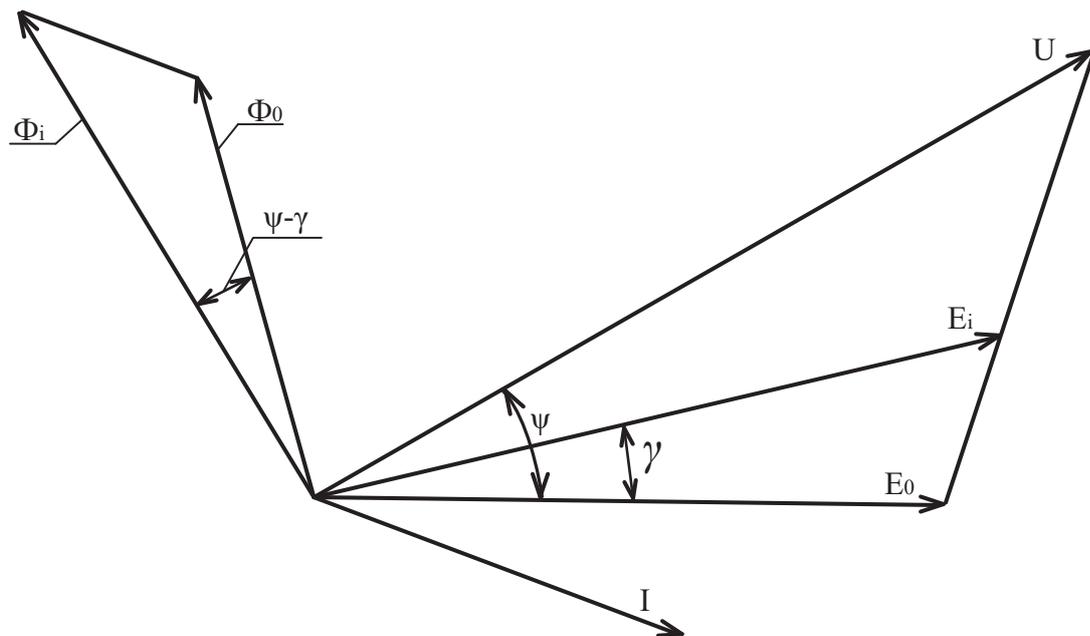
бочки ротора. Количество короткозамкнутых витков влияет как на величину МДС встречного тока и величины индуктивного и активного сопротивлений короткозамкнутого контура, так и на равномерность нагрева бочки ротора током возбуждения. С увеличением количества короткозамкнутых витков степень нагрева будет увеличиваться.

При наличии относительно небольшого числа замкнутых витков изменение тока возбуждения ненагруженного СД может не вызвать изменения амплитуды вибрации. Такое явление может быть в



**Рис. 3.** Схема влияния несимметричной демпферной системы на равномерность магнитных полей: а) двухполюсное поле; б) четырехполюсное поле: 1-1 – замкнутый виток

**Fig. 3.** Plan of influence of unbalanced damper system on uniformity of magnet fields: a) bipolar field; b) quadripolar field: 1-1 is the turn-to-turn short-circuits



**Рис. 4.** Векторная диаграмма синхронного двигателя

**Fig. 4.** Vectogram of synchronous motor

том случае, когда силы одностороннего тяжения между ротором и статором СД вызывают меньшее изменение вибрации агрегата, чем чувствительность и точность применяемого виброизмерительного прибора, а также если вектора равнодействующих сил первоначальной неуравновешенности  $P_i$  (рис. 5, а), соответствующей режиму без нагрузки на валу, и одностороннего магнитного тяжения между ротором и статором СД  $P_s$  расположены под углом, близким к  $120^\circ$  и не сильно отличаются друг от друга по величине. В последнем случае равнодействующая  $P_{\Sigma xx}$  векторов сил  $P_i$  и  $P_s$  будет приблизительно равна  $P_i$ , что не вызовет изменения амплитуды вибрации, однако при этом изменится фаза вибрации на угол, близкий к  $60^\circ$ .

При изменении тока возбуждения СД до тока полной нагрузки величина вектора силы  $P_s$  увеличится на 10...15 % вместе с ростом возбуждения СД за счет увеличения индукции при росте потока  $\Phi_i$  (предполагается, что напряжение на зажимах СД неизменно) и равнодействующая векторов сил  $P_i$  и  $P_s$  будет близка к  $P_{\Sigma xx}$ . Поэтому при сравнительно быстрых изменениях тока возбуждения вибрация агрегата изменяться не будет. Под воздействием причин, изложенных ранее, начнется неравномерный нагрев бочки ротора, вызывающий её деформацию. Направление вектора центробежной силы  $P_i$ , обусловленной прогибом бочки ротора, будет совпадать с вектором  $P_s$ . При установившемся нагреве бочки ротора равнодействующая сила  $P_{\Sigma p}$  изменится относительно  $P_{\Sigma xx}$  как по величине, так и по фазе (рис. 5, а). При этом изменение вектора силы, зависящей от тока возбуждения ( $P_i+P_s$ ), будет всегда неизменно по фазе.

Если при неизменном токе ротора, установившийся вибрационный режим которого показан на рис. 5, а, произвести изменение активной нагрузки, то между осью полюсов и магнитным потоком СД возникает угол  $\psi-\gamma$ , где  $\psi$  – угол между осью полюсов и вектором напряжения статора;  $\gamma$  – угол между вектором внутренней ЭДС СД  $E_i$  и вектором напряжения статора. Учитывая, что вектора  $P_i$  и  $P_s$  повернутся вместе с ротором на угол  $\psi$ , векторная диаграмма сил, действующих на ротор, примет вид, показанный на рис. 5, б. При этом произойдет увеличение вектора  $P_i$  за счет повышения неравномерности нагрева. Суммарный вектор  $P_i+P_s$  увеличится и незначительно изменится по фазе на угол, меньший чем  $\psi-\gamma$ . Если  $P_i > P_s$ , то с достаточной для практики точностью можно считать, что с изменением активной нагрузки в результате прогрева ротора будет изменяться величина вибрации, но не её фаза. Таким образом, наиболее характерным признаком влияния виткового замыкания на вибрацию агрегата можно считать практическую неизменность фазы усилий, действующих на ротор при изменениях активной и реактивной нагрузок.

Для СД, не имеющих параллельных цепей в обмотке статора, изложенные явления будут выражены значительно слабее, чем при наличии параллельных ветвей, так как отсутствие уравнивающих токов в обмотке статора уменьшает неравномерность нагрева ротора. Кроме того, относительно меньшая длина ротора (меньшая мощность машин без параллельных цепей в обмотке статора) вызовет также меньший прогиб ротора от неравномерного нагрева бочки ротора по окружности.

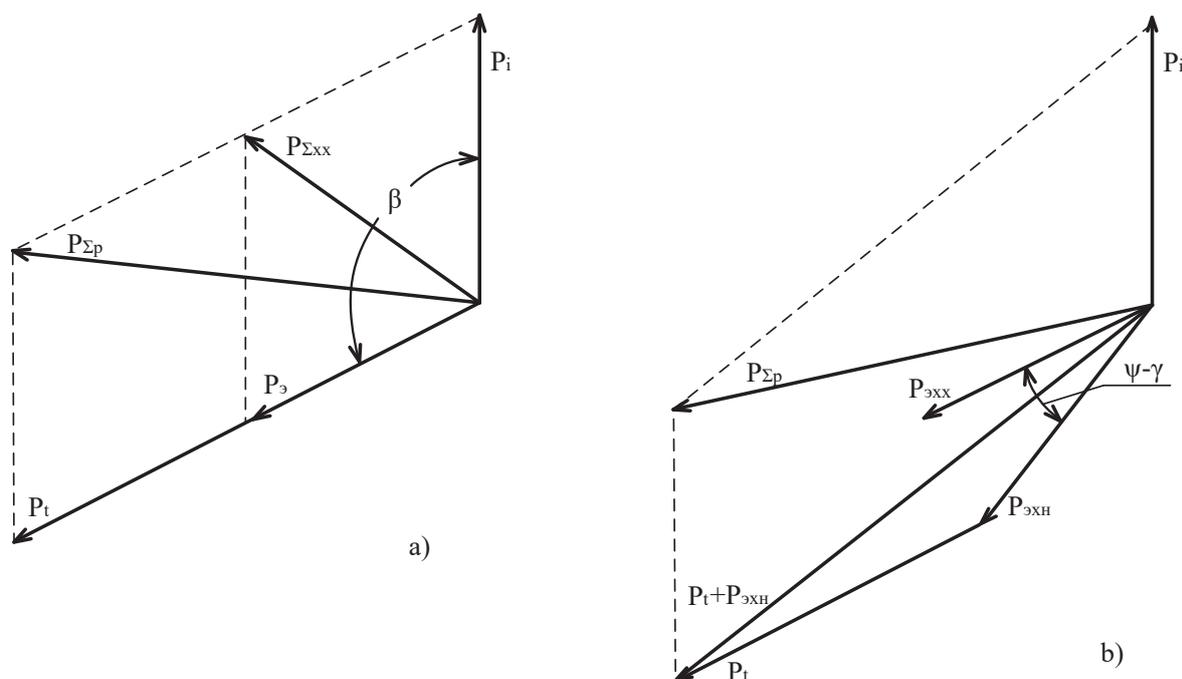


Рис. 5. Векторная диаграмма сил: а) без нагрузки; б) при нагрузке

Fig. 5. Vectogram of forces: a) without loading; b) with loading

Появление дисбаланса за счет изменения геометрии ротора во время технологического процесса вследствие неравномерности нагрева ротора является не одномоментной неуравновешенностью, которую можно устранить при помощи балансировки ротора. Такой дисбаланс требует иного технического решения по снижению величины вибрации. Необходимо иметь систему диагностики, позволяющую идентифицировать источник вибрации и устранять первопричину, то есть восстанавливать межвитковую изоляцию обмотки ротора.

#### Выводы

1. Установлено, что витковые замыкания в обмотке ротора вызывают изменение уровня вибрации не столько вследствие изменения магнитного тяжения, сколько из-за неравномерности нагрева бочки ротора.
2. Неравномерность нагрева бочки ротора, вызванная витковым замыканием в обмотке ротора синхронного двигателя, вносит существен-

ное изменение уровня вибрации. Изменение вибрации носит режимный характер вследствие зависимости от тока возбуждения и из-за тепловой инерции бочки ротора.

3. Для синхронных турбодвигателей, имеющих параллельные ветви в обмотке статора, несимметрия нагрева значительно сильнее, чем без параллельных ветвей, поскольку отсутствие уравнительных токов в обмотке статора уменьшает неравномерность нагрева ротора.
4. При изменении виброактивности синхронного турбодвигателя требуется тщательная проверка машины на предмет возникновения электрического повреждения в обмотке возбуждения, поскольку влияние виткового замыкания в обмотке возбуждения на изменение геометрии ротора при неравномерном нагреве его бочки является не одномоментной неуравновешенностью, которую можно устранить при помощи однократной балансировки ротора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 478 с.
2. Optimum control for multiple computer complex of oil field formation pressure maintenance system / V.V. Sushkov, M.K. Veliev, V.V. Timoshkin, T.D. Gladkih // *Oil Industry*. – 2017. – V. 2. – P. 82–84.
3. Алексеев Б.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов. – М.: НИЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
4. Roytgarts M. Method of Shorted Turn Monitoring in the Turbo-generator Rotor Winding // *Int. Conf. on Electric Power Systems*. – Spain, Tenerife, 2005. – P. 468–473.
5. Sergeev V.L., Polishchuk V.I. Adaptive identification method of a signal from stray field magnetic sensor for turbogenerator diagnostics // *Journal of Siberian Federal University*. – 2015. – V. 8 (2). – P. 201–207.
6. Полищук В.И., Хамухин А.А. Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет анализа магнитных потоков рассеяния // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 82–93.
7. Способ раннего обнаружения витковых замыканий и диагностирования технического состояния обмотки ротора турбогенератора с определением тока ротора по параметрам статора: пат. Рос. Федерация № 2472168; заявл. 15.03.2011; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1.
8. Ma H.Z., Pu L. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings // *J. Electromagnetic Analysis & Applications*. – 2009. – V. 3. – P. 187–191.
9. Hamid Yaghoobi, Habib Rajabi Mashhadi, Kourosh Ansari. Artificial neural network approach for locating internal faults in salient-pole synchronous generator // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – V. 38. – P. 13328–13341.
10. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short Circuit of Rotor Windings of Turbo-Generators Based on the Thermodynamics Modeling Method / Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou // *Journal of Power Electronics*. – 2011. – V. 11. – № 3. – P. 759–766.
11. Polishchuk V.I., Sergeev V.L., Kalayda V.T. Models and Algorithms of Non-Stationary Signal Identification in Conditions of Uncertainty // *XII International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016)*. – Moscow, Russia, May 12–14, 2016. – P. 238–244.
12. Глебов И.Я., Данилевский Я.Б. Диагностика турбогенераторов. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1989. – 119 с.
13. Ковалев В.К. Факторы влияния на вибрацию газоперекачивающих агрегатов с синхронными приводами // *Газовая промышленность*. – 2015. – № 3 (719). – С. 101–104.
14. Influence of Unbalanced Magnetic Pull on Free Vibration Characteristics of Motor Rotor Based on Multi-Scale Method / F. Liu, H. Liu, C. Xiang, Y. Wu, Z. Zhan // *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*. – 2017. – № 53 (16). – P. 52–60.
15. Non-Invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations / M. Cuevas, R. Romary, J.-P. Lecoine, T. Jacq // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2016. – № 52 (7). – P. 632–638.
16. Vibration study and classification of rotor faults in PM synchronous motor / Y. Yu, C. Bi, Q. Jiang, N.L.H. Aung, A.A. Mamun // *Microsystem Technologies*. – 2014. – № 20 (8–9). – P. 1653–1659.
17. Ахмедшина М.В., Прусс В.В. Поход к учету вибрационных параметров асинхронных двигателей при изменении состояния конструктивных элементов // *Вестник КГУ им М. Остроградского*. – 2010. – № 4 (63). – Ч. 3. – С. 77–83.
18. Accurate rotor fault detection in doubly-fed Wound-Rotor Induction Machine / Y. Gritli, A. Tani, C. Rossi, D. Casadei, F. Filippetti // *Electric International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2017*. – Santa Margherita Ligure (GE), Italy, 2017. – P. 756–760.
19. Справочник по электротехническим материалам: в 3 т. / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
20. Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Ребрушкин М.Н. Виды и причины вибрации электрических машин // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2015. – № 5. – С. 32–36.

Поступила 15.09.2017 г.

#### **Информация об авторах**

**Полищук В.И.**, доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарского государственного технического университета.

**Герасимов Н.В.**, старший диспетчер ОДС Самарского РДУ АО «СО ЕЭС».

**Крицкий М.В.**, диспетчер ОДС Самарского РДУ АО «СО ЕЭС».

**Глазырин А.С.**, доктор технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.31

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL DAMAGE IN FIELD MAGNETIZING COIL ON SYNCHRONOUS ROUND-ROTOR MOTOR VIBRATION

**Vladimir I. Polishchuk**<sup>1</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

**Nikolay V. Gerasimov**<sup>2</sup>,  
nvgerasimov@yandex.ru.

**Mikhail V. Kritsky**<sup>2</sup>,  
nurochka18@yandex.ru.

**Alexander S. Glazyrin**<sup>3</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

<sup>1</sup> Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

<sup>2</sup> Regional dispatching office of the Samara Area, «SO UPS»,  
5, Polevaya street, Samara, 443100, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Powerful high-voltage synchronous motors with STD and STDP round rotor series are the main elements of oil gathering system and maintaining reservoir pressure. This fact increases the operational reliability demands. Vibration condition is one of the key parameters controlled in operation. The vibration sources are mechanical and electrical. Generally, a small number of field-turns in the field magnetizing coil leads to a slight change in the symmetry of a magnetic pull. Because of the fact that a short circuit can have the intermittency of stimulation and exist in the motor for a long period of time without exerting marginal impact on operating mode, such damages are checked only at engine overhaul. Thus it is necessary to consider a number of negative effects caused by short circuits in the field magnetizing coil, such as increased wear of the bearings and a sharp decline in bearing lube oil resource due to transverse parasitic currents. The article analyzes the degree of influence of electrical damage on vibration condition of synchronous round-rotor motor.

**The aim** of the research is to assess the degree of influence of electrical damage in a field magnetizing coil of a synchronous round-rotor motor on vibration condition of the latter.

**Methods.** The authors have used the calculation methods adopted in the theory of electrical machines to assess the influence of electrical damages in the field magnetizing coil of the synchronous round-rotor motor.

**Results.** It was found that the turn-to-turn short-circuit in the rotor winding leads to vibration level changes not so much because of the magnetic pull changes as due to the uneven heating of the rotor body. The vibration state change is affected by a slight temperature difference. In case of a vibrostatus changes, it is required to check the electrical machine for electric damage occurrence in a drive winding.

### Key words:

Synchronous round-rotor motor, turn-to-turn short-circuit, vibration, field magnetizing coil, diagnostics.

### REFERENCES

1. Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikiy S.N., Ershov M.S., Yarizov A.D. *Novye tehnologii i sovremennoe oborudovanie v elektroenergetike neftegazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in electrical power plants of oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 478 p.
2. Sushkov V.V., Veliev M.K., Timoshkin V.V., Gladkih T.D. Optimum control for multiple computer complex of oil field formation pressure maintenance system. *Oil Industry*, 2017, vol. 2, pp. 82–84.
3. Alekseev B.A. *Opreделение sostoyaniy (diagnostika) krupnykh turbogeneratorov* [Determination states (diagnosis) of large turbogenerators]. Moscow, NC ENAS Publ., 2001. 152 p.
4. Roytgarts M. Method of Shorted Turn Monitoring in the Turbogenerator Rotor Winding. *Int. Conf. on Electric Power Systems*. Spain, Tenerife, 2005. pp. 468–473.
5. Sergeev V.L., Polishchuk V.I. Adaptive identification method of a signal from stray field magnetic sensor for turbogenerator diagnostics. *Journal of Siberian Federal University*, 2015, no. 8 (2), pp. 201–207.
6. Polishchuk V.I., Khamukhin A.A. The impact of turn to turn short circuits of synchronous generator rotor winding based on wavelet analysis of leakage flux. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 82–93. In Rus.
7. Belov V.S., Glezerov S.N., Parkhomenko Yu.S. *Sposob rannego obnaruzheniya vitkovkoyh zamykaniy i diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya obmotki rotora turbogeneratora s opredeleniem toka rotora po parametram statora* [Method of turn-to-turn short circuits early detection and diagnosis of the turbogenerator rotor winding technical condition with definition of rotor current using stator parameters]. Patent RF, no. 2472168, 2011.
8. Ma H.Z., Pu L. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings. *J. Electromagnetic Analysis & Applications*, 2009, vol. 3, pp. 187–191.
9. Hamid Yaghoobi, Habib Rajabi Mashhadi, Kourosh Ansari. Artificial neural network approach for locating internal faults in salient-pole synchronous generator. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38, pp. 13328–13341.
10. Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short

- Circuit of Rotor Windings of Turbo-Generators Based on the Thermodynamics Modeling Method. *Journal of Power Electronics*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 759–766.
11. Polishchuk V.I., Sergeev V.L., Kalayda V.T. Models and Algorithms of Non-Stationary Signal Identification in Conditions of Uncertainty. *XII International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016)*. Moscow, Russia, May 12–14, 2016. pp. 238–244.
  12. Glebov I.Ya., Danilevsky Ya.B. *Diagnostika turbogeneratorov* [Diagnosis of turbogenerators]. Leningrad, Nauka Publ., 1989. 119 p.
  13. Kovalev V.K. Factors changing vibration of assemblies of swapping of gas with synchronous drives. *Gas Industry Magazine*, 2015, no. 3 (719), pp. 101–104. In Rus.
  14. Liu F., Liu H., Xiang C., Wu Y., Zhan Z. Influence of Unbalanced Magnetic Pull on Free Vibration Characteristics of Motor Rotor Based on Multi-Scale Method. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 53 (16), pp. 52–60.
  15. Cuevas M., Romary R., Lecointe J.-P., Jacq T. Non-Invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, no. 52 (7), pp. 632–638.
  16. Yu Y., Bi C., Jiang Q., Aung N.L.H., Mamun A.A. Vibration study and classification of rotor faults in PM synchronous motor. *Microsystem Technologies*, 2014, no. 20 (8–9), pp. 1653–1659.
  17. Akhmetshina M.V., Pruss V.V. Forecasting vibration parameters of asynchronous motor with provision for changes condition structural elements. *Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2010, no. 4 (63), P. 3, pp. 77–83. In Rus.
  18. Gritli Y., Tani A., Rossi C., Casadei D., Filippetti F. Accurate rotor fault detection in doubly-fed Wound-Rotor Induction Machine. *Electric International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2017*. Santa Margherita Ligure (GE), Italy, 2017. pp. 756–760.
  19. *Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam* [Directory on electrotechnical materials]. Ed. by Yu.V. Koritsky. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 464 p.
  20. Mindrin V.I., Pachurin G.V., Rebrushkin M.N. Types and causes of vibration power machines. *Modern high technologies*, 2015, no. 5, pp. 32–36. In Rus.

Received: 15 September 2017.

#### Information about the authors

**Vladimir I. Polishchuk**, Dr. Sc., associate professor, Samara State Technical University.

**Nikolay V. Gerasimov**, power system senior manager of the dispatch service, Regional dispatching office of the Samara Area, «SO UPS».

**Mikhail V. Kritsky**, power system manager of the dispatch service, Regional dispatching office of the Samara Area, «SO UPS».

**Alexander S. Glazyrin**, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.