

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НА УРОВЕНЬ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В СХЕМЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

А.В. ЛИПАТКИН, Н.Б. ГОРОХОВА, И.Ю. ТАЩИЛИН, О.В. КРЮКОВ  
(ООО "ТСН-электро", г. Н. Новгород)  
В.Н. МЕЩЕРЯКОВ (ЛГТУ г. Липецк)



Рассмотрены современные подходы к исследованию уровня высших гармонических искажений в распределительных сетях предприятий топливно-энергетического комплекса. При компьютерном моделировании предложены модели силового трансформатора и другого электрооборудования в специализированном программном комплексе для расчетов гармонических искажений. На основании полученных результатов исследований мощности сухого трансформатора на уровень гармонических искажений тока и напряжений в схеме распределительной сети представлены рекомендации по энергоэффективным режимам работы систем электроснабжения.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование; система электроснабжения; трансформатор; гармонические искажения; распределительная сеть.

## ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, основным источником гармоник в системах электроснабжения (СЭС) предприятий ТЭК является шести-импульсный низковольтный частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) [1-4], используемый для

регулирования технологических параметров производственных процессов. Доля ЧРП в последнее время постоянно растет в части общей нагрузки предприятий [5-8]. Поэтому исследования уровней гармонических искажений в СЭС с трансформаторными подстанциями (рис. 1) в различных режимах становится неотъемлемой составляющей при проектировании и эксплуатации электро-энергетических систем (ЭС) с целью анализа уровня высших гармоник (ВГ) токов и напряжений сети.

В случае превышения допустимого уровня ВГ разрабатываются корректирующие мероприятия для обеспечения допустимого уровня гармонических искажений для каждого типа электрооборудования [9-12] с оценкой их эффективности.

Исследование уровня ВГ может быть выполнено по одной из следующих методик:

- ручной экспресс-анализ для ограниченных участков СЭС [13-16];
- сопоставление с типовыми отраслевыми аналогичными уровнями СЭС [17];
- полевые измерения уровня ВГ в СЭС на соответствие ОСТ трудоемки и дороги, а отражают только системные условия (не наилучшие) [18] и без учета сезонных изменений [19];



Рис. 1. Общий вид комплектного распределительного устройства

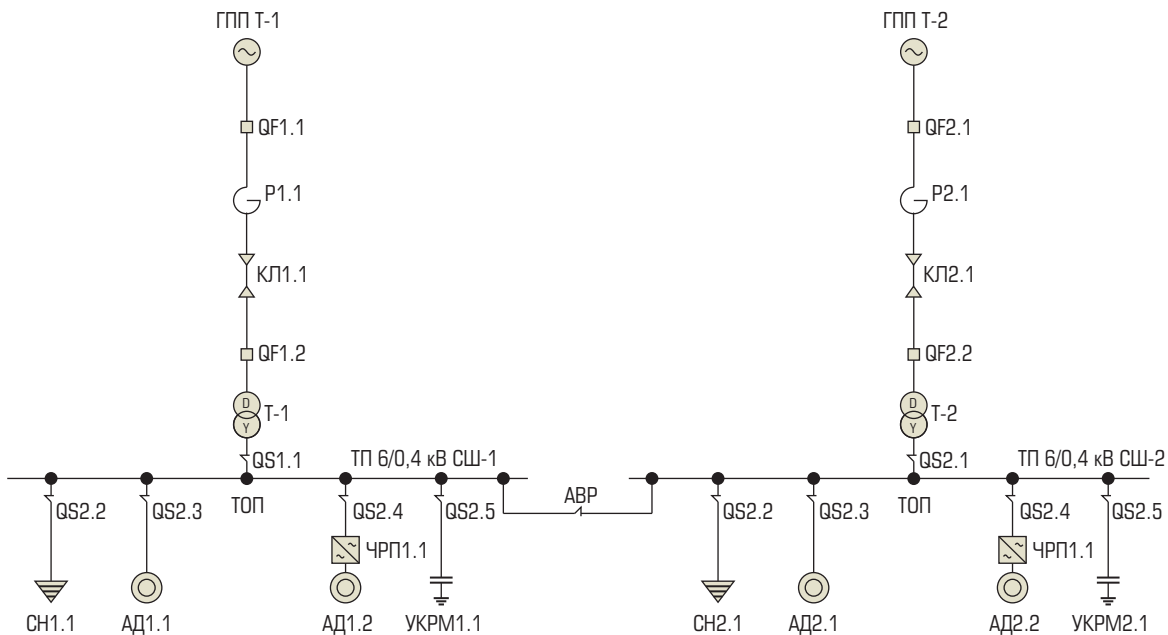


Рис. 2. Схема для исследования трансформаторной подстанции, питающей один из участков технологической установки предприятия

- математическое моделирование при использовании адекватного ПО является наиболее эффективным методом анализа ВГ, оценки эффективности корректирующих мероприятий в процессе проектирования и эксплуатации существующей СЭС, поскольку отслеживает изменения режимов, конфигурации СЭС и значения нелинейной нагрузки [17, 20-23].
- допустимый уровень гармоник в точках присоединения согласно стандартам;
- значение нагрузки (активная и реактивная мощности) для всех электродвигателей.

Исследование влияния вариации параметров электрооборудования СЭС предприятия на уровень ВГ выполним на примере участка сети (рис. 2), питающего часть технологического оборудования с наибольшим количеством ЧРП по сравнению с другими технологическими установками согласно результатам исследований [4, 25].

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В общем случае для создания математической модели СЭС предприятий ТЭК и последующего анализа ВГ требуются следующие исходные данные [17, 24]:

- однолинейная схема исследуемой СЭС НПП и ее исследуемые конфигурации;
- значение тока КЗ и отношение сопротивлений  $X/R$  (реактивного к активному) СЭС;
- полное сопротивление линий, кабелей, шинопроводов, реакторов и их напряжение;
- сопротивление, мощность и тип соединения обмоток силовых трансформаторов;
- мощность, напряжение, число ступеней для конденсаторных установок;
- номинальные параметры ЧРП и испытательные протоколы от коэффициента загрузки;
- протоколы испытаний ЭС с результатами измерений ВГ тока и напряжения;

Выбранный объект для исследований позволяет наиболее широко охватить диапазон мощностей 6-импульсных ЧРП АТВ630 и оценить их влияние на силовое электрооборудование, а также выявить влияние силовых трансформаторов на величину гармоник тока и напряжения, трансформируемых из низковольтных сетей в сети напряжением выше 1000 В.

Внешнее электроснабжение исследуемой СЭС ТП 6,3/0,4 кВ выполнено по радиальной раздельной схеме питания с низковольтным АВР и осуществляется от источников питания, в качестве которых приняты силовые трансформаторы центра питания предприятия.

Данные по оборудованию моделируемой электротехнической системы, электрическим двигателям, статической нагрузке и УКРМ приведены в [2, 26]. Значение инъекций для  $n$ -го порядка гармоник тока для низковольт-

ного ПЧ мощностью от 75 кВт до 315 кВт АТВ630 при 100 % нагрузке без компенсационных дросселей были приняты согласно паспортным данным, в связи с чем в спектре тока и напряжения исследуемой схемы будут присутствовать гармоники следующих порядков  $n$ : 5, 7, 11, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47 и 49.

Согласно стандарту [27] и соотношению тока КЗ к максимальному току нагрузки в ТОП, находящийся в следующем диапазоне  $20 < ISCIL < 50$  предельное допустимое значение  $TDD$  принято равным 8 % для всех исследуемых режимов схемы рис. 1.

**МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В качестве инструмента для создания математической модели и последующего компьютерного моделирования с использованием методов численного моделирования для исследования влияния ВГ на электрооборудование СЭС предприятий ТЭК выбран программный комплекс, который включает в себя несколько специализированных программных модулей [2, 20]. Особенностью данного программного комплекса является возможность создания, моделирования и анализа различных конфигураций низковольтной и высоковольтной СЭС, которые могут достигать в размере несколько десятков тысяч элементов. В процессе разработки математической модели СЭС и проведения экспериментальных исследований учитывались рекомендации стандарта [28] в части создания моделей электрооборудования, а также подходов к анализу потенциальных проблем в области электромагнитной совместимости и оценке эффективности корректирующих мер с использованием современных программных комплексов.

Для исследования влияния параметров электрооборудования СЭС предприятия на уровень ВГ выбран модуль “Гармонический анализ и качество ЭЭ” программного комплекса, который имеет возможность расчета и анализа показателей нормирования гармонических составляющих напряжения и тока для узлов нагрузки (СКГСН) и ветвей (СКГСТ) СЭС, среднеквадратичных значений напряжения шин и тока ветвей и пиковых значений тока ветвей.

Данный программный модуль позволяет исследовать установившиеся нормальные и ремонтные режимы СЭС с учетом текущих и пер-

спективных значений гармоник напряжения для узлов и тока для ветвей, обусловленных нелинейной нагрузкой, в соответствии с [29].

Кроме того, можно выполнять непрерывный анализ частоты для вычисления импеданса сети с целью идентификации последовательных и параллельных резонансов, используя метод узловых напряжений, основанный на следующих принципах:

- 1) расчеты режимов для каждой гармоники производятся независимо друг от друга;
- 2) нелинейные электроприемники моделируются в виде источников тока основной и ВГ;
- 3) элементы сети моделируются в виде схем замещения с линейными сопротивлениями;
- 4) источник питания (ЭЭС) на основной частоте вводится в схему как источник ЭДС бесконечной мощности, а на повышенных частотах – в виде Г-образной схемы замещения.

Данный метод сформулирован для решения уравнений узловых напряжений, результатом которого являются напряжения в узлах схемы, токи и мощности продольных и поперечных ветвей схемы, потери мощности в элементах схемы, которые могут быть представлены набором следующих линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} Y_{11}(n) & -Y_{12}(n) & \dots & -Y_{1n}(n) \\ -Y_{12}(n) & Y_{22}(n) & \dots & -Y_{2n}(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{1n}(n) & -Y_{2n}(n) & \dots & Y_{nn}(n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(n) \\ V_2(n) \\ \dots \\ V_n(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1(n) \\ I_2(n) \\ \dots \\ I_n(n) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где:  $Y_{ij}$  – элемент матрицы проводимости  $Y$  ветви между узлом  $i$  и узлом  $j$  для гармоники  $n$ -го порядка;  $V_i(n)$  – напряжение в  $i$ -ом узле схемы СЭС предприятия для гармоники  $n$ -го порядка;  $I_j(n)$  – ток в ветви в  $j$ -ом узле схемы СЭС для гармоники  $n$ -го порядка.

Также необходимо обратить внимание, что структура и значения матрицы  $Y$  зависят от последовательности гармоники (прямая, обратная или нулевая) и их порядка, так как для каждого порядка гармоники ( $n$ ) необходимо рассчитывать новую матрицу  $Y_n$ .

Значение гармонического тока в каждой ветви матрицы  $Y$  может быть найдено согласно решению уравнения гармонических напряжений:

$$I_{ij}(n) = (V_i(n) - V_j(n)) \cdot Y_{ij}(n), \quad (2)$$

где  $I_h$  – ток в ветви, протекающий от узла  $i$  к узлу  $j$  для гармоники  $n$ -го порядка.

Суммирование ВГ в СЭС как в нормальном, так и в ремонтном режиме, осуществляется согласно стандарту [29] и описывается как “второй закон суммирования”, применимый как к напряжению, так и к току, и математически описывается по формуле:

$$U_n = \alpha \sqrt{\sum_{n=0}^N U_n^2}, \quad (3)$$

где  $U_n$  – результирующая величина напряжения гармоники для рассматриваемой совокупности  $N$  источников для  $n$ -го порядка, а  $\alpha$  – показатель степени, приведенный в таблице 1 [30].

### МОДЕЛИ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Математическая модель СЭС для моделирования и анализа уровня ВГ может составляться с учетом гармонических искажений как поступающих из внешней сети, так и источников гармонических искажений, находящихся в самой СЭС предприятия.

В первом случае моделирование гармоник напряжения, приходящих в точках присоединения из питающей сети, возможно при помощи источника напряжения эквивалентной модели Нортона. Для каждой гармоники напряжения  $U_n$  определяется ток  $I_n$  с учетом сопротивления  $Z$  и сопротивления питаемой сети. Принято, что питаю-

**Таблица 1. Показатели суммирования в соответствии с гармоническим порядком согласно IEC 61000-3-6**

$\alpha$	$n$
1	$n < 5$
1,4	$5 \leq n \leq 10$
2	$n > 10$

щая сеть не оказывает негативное влияние на уровень ВГ в СЭС. Во втором случае для расчета распространения гармоник тока в трехфазных сетях с симметричной нагрузкой внутри СЭС можно принять ПЧ как источник тока [4, 25], который выражается в виде определенного ряда токовых гармоник. Величина гармоник индивидуальна для ПЧ определенного производителя и не зависит от других нагрузок и от эквивалентного сопротивления сети.

В качестве источника тока влияние параметров элементов СЭС на уровень высших гармонических искажений принят низковольтный ПЧ мощностью 132 кВт АТВ630 без компенсационных дросселей, уровень гармоник тока которого для 100 % его нагрузки представлен в таблице 2.

Инжектируемые в сеть гармоники тока от ЧРП, замыкаясь через линейную нагрузку, емкости, источник питания, обуславливают соответствующие гармоники напряжения в точках присоединения. Гармоники тока обуславливают соответствующие гармоники напряжения.

**Таблица 2. Уровни ВГ тока НВ ПЧ АТВ630 без компенсационных дросселей при 100 % нагрузке**

Мощность ПЧ	Ток	Значение уровня гармонических искажения тока для $n$ -го порядка																	
		$n1$	$n5$	$n7$	$n11$	$n13$	$n17$	$n19$	$n23$	$n25$	$n29$	$n31$	$n35$	$n37$	$n41$	$n43$	$n47$	$n49$	$THLi$
кВт	А	А	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
75	131,3	122	32,2	17,9	8,52	6,29	5,13	4,02	3,6	2,96	2,71	2,31	2,13	1,86	1,71	1,53	1,4	1,27	39,4
90	156,2	144	35	19,5	8,46	6,19	5,03	3,86	3,49	2,82	2,61	2,2	2,04	1,76	1,63	1,44	1,32	1,19	42,3
110	192,2	175	37,6	20,9	8,35	6,03	4,87	3,62	3,3	2,6	2,5	2,0	1,9	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	45,1
<b>132</b>	<b>226,6</b>	<b>210</b>	<b>34,4</b>	<b>18</b>	<b>8,38</b>	<b>5,79</b>	<b>4,89</b>	<b>3,62</b>	<b>3,3</b>	<b>2,6</b>	<b>2,4</b>	<b>2,0</b>	<b>1,9</b>	<b>1,6</b>	<b>1,5</b>	<b>1,3</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>41,0</b>
160	271,5	254	31,6	15,6	8,42	5,68	4,9	3,64	3,3	2,6	2,4	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	37,7
220	379,2	354	32,6	15	8,2	5,21	4,63	3,32	3,1	2,4	2,2	1,8	1,6	1,3	1,1	1,0	0,8	0,8	38,0
250	429,5	402	32,3	14,4	8,15	5,09	4,57	3,25	3,0	2,3	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	37,4
315	542,3	508	32,7	13,9	8,05	4,8	4,39	3,04	2,8	2,1	1,9	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,6	0,6	37,4

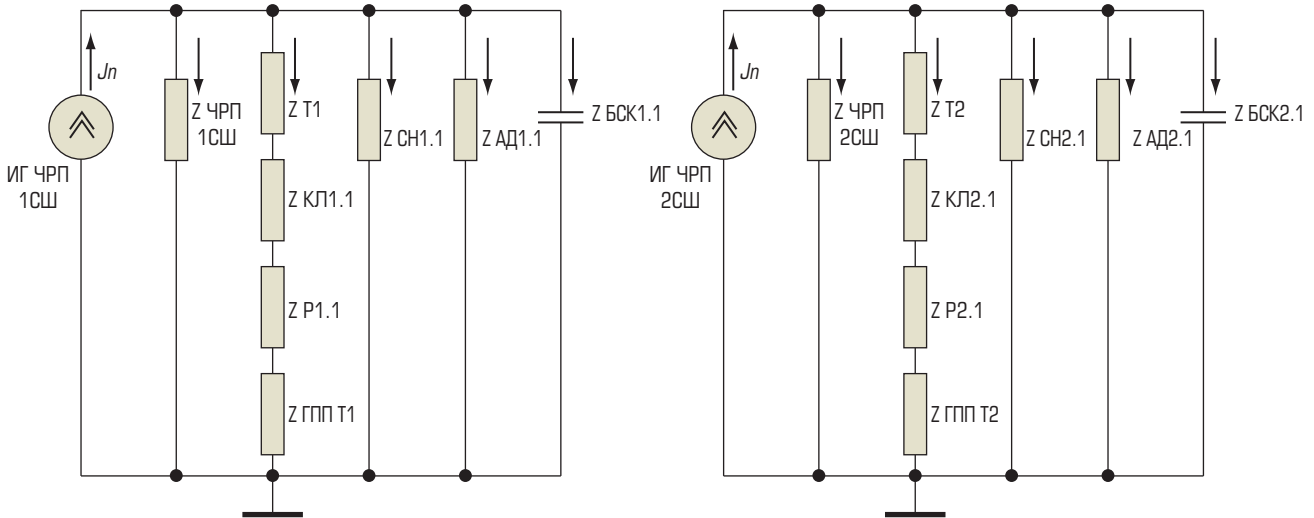


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения трансформаторной подстанции, питающей участок технологической установки для нормального режима

Пример схемы замещения исследуемой схемы СЭС для нормального режима представлен на рис. 3, где:

$J_n$  – гармоническая составляющая источника тока искажения ЧРП;

$Z_{\text{ЧРП 1СШ}}$ ,  $Z_{\text{ЧРП 2СШ}}$  – сопротивление линейной части нагрузки ЧРП для  $n$ -ой гармоники;

$Z_{\text{ГПП Т-1}}$ ,  $Z_{\text{ГПП Т-2}}$  – сопротивление источника мощностью для  $n$ -ой гармоники;

$Z_{\text{Р1.1}}$ ,  $Z_{\text{Р2.1}}$  – сопротивление реактора для  $n$ -ой гармоники;

$Z_{\text{КЛ1.1}}$ ,  $Z_{\text{КЛ2.1}}$  – сопротивление кабельной линии для  $n$ -ой гармоники;

$Z_{\text{Т1}}$ ,  $Z_{\text{Т2}}$  – сопротивление двухобмоточного трансформатора для  $n$ -ой гармоники;

$Z_{\text{СН1.1}}$ ,  $Z_{\text{СН2.1}}$  – сопротивление статической нагрузки для  $n$ -ой гармоники;

$Z_{\text{АД1.1}}$ ,  $Z_{\text{АД2.1}}$  – сопротивление асинхронного электродвигателя для  $n$ -ой гармоники;

$Z_{\text{УКРМ1.1}}$ ,  $Z_{\text{УКРМ2.1}}$  – сопротивление конденсаторной батареи для  $n$ -ой гармоники.

Необходимо отметить, что схем замещения СЭС предприятия существует столько, сколько СЭС содержит гармоник.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НА УРОВЕНЬ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЙ В СХЕМЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

В качестве примера проведем численный анализ влияния изменения мощности ( $S_T$ ) сухого силового трансформатора 6/0.4 кВ стандартного исполнения *Trihal* в диапазоне от 1250 до 2500 кВА в схеме распределительных

сетей предприятия на уровень гармонических искажений тока и напряжения в ЭЭС технологической установки. Исследования проведены с учетом наличия и отсутствия установок компенсации реактивной мощности (УКРМ). При этом использовались следующие показатели нормирования гармонических составляющих напряжения и тока для узлов нагрузки и ветвей СЭС:

- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (СКГСН);
- *total demand distortion (TDD)*;
- коэффициент гармонической нагрузки конденсаторов (КГНК);
- взвешенный коэффициент искажения напряжения (ВКИНД);
- *k-factor*.

Полученные результаты исследований для нормального режима схемы СЭС без учета УКРМ для всего диапазона значений  $S_T$  показали, что значения СКГСН, представленные на рис. 4, находятся в пределах 1,91-2,63 % и соответствуют требованиям стандарта [28]. Для ремонтного режима схемы СЭС без учета УКРМ для всего диапазона значений  $S_T$  полученные результаты исследований показали, что значения СКГСН соответствуют требованиям [28], так как находятся в пределах 2,53-3,28 %. Данные значения СКГСН свидетельствуют о безопасной эксплуатации электрооборудования по [28], а также требованиям производителя *SE* сухого трансформатора к уровню ВГ (СКГСН  $\leq 5\%$ ).

Для нормального и ремонтного режимов схем СЭС без УКРМ для всего диапазона изменения значений  $S_T$  установлено различие между значениями СКГСН в диапазоне



0,62-0,65 %, что говорит об отсутствии влияния режимов в схеме СЭС без учета УКРМ на ВГ.

При исследовании нормального режима схемы СЭС с учетом УКРМ для всего диапазона значений  $S_T$  были получены значения СКГСН, которые находятся в пределах 3,00-3,74 % и соответствуют [28] и производителя SE сухого трансформатора к уровню ВГ (СКГСН  $\leq 5\%$ ), что свидетельствует о безопасной эксплуатации. Для ремонтного режима схемы СЭС с учетом УКРМ для всего диапазона значений  $S_T$  значения СКГСН находятся в диапазоне 7,04-19,41 %, что обусловлено возникновением параллельного резонанса вследствие наличия в схеме СЭС с учетом УКРМ при значении  $S_T$ , равном 1600 кВА, который приводит к усилению тока и напряжения на 7-ой гармонике. При данном уровне ВГ в ремонтной схеме СЭС не обеспечивается безопасная эксплуатация при значениях  $S_T$ , равных 1250, 1600 и 2000 кВА, согласно [28], а также требованиям производителя (SE) сухого трансформатора к уровню ВГ (СКГСН  $\leq 5\%$ ). Для нормального и ремонтного режимов схем СЭС с учетом УКРМ для всего диапазона изменения  $S_T$  установлено различие между значениями СКГСН, которое находится в диапазоне 4,04-15,67 %, что свидетельствует о влиянии режимов в схеме СЭС с учетом УКРМ на уровень ВГ.

Полученные результаты расчетов значений  $TDD$  (рис. 5) повторяют зависимость, полученную при исследовании значений СКГСН на всем диапазоне изменения значений  $S_T$ . Для нормальных и ремонтных схем СЭС без учета УКРМ значения  $TDD$  для всего диапазона изменения значений  $S_T$  находятся в диапазоне 4,26-6,99 %, что свидетельствует о безопасной эксплуатации электрооборудования согласно стандарту [27].

В нормальном и ремонтном режимах схем СЭС с учетом УКРМ значения  $TDD$  находятся в диапазоне 11,96-33,63 %, что превышает требования стандарта [27]. Максимальное значение  $TDD$  (33,63 %), которое превышает на 25,63 % допустимое значение стандартом [27], было выявлено при значении  $S_T$ , равном 1600 кВА, что свидетельствует о влиянии УКРМ и ремонтного режима на уровень ВГ в СЭС вследствие возникновения параллельного резонанса на 7-ой гармонике. Полученные значения  $TDD$  для всего диапазона значений  $S_T$  для нормального и ремонтного режимов схем СЭС с учетом УКРМ свидетельствуют о том, что согласно [27] при таком уровне ВГ в СЭС не обеспечивается безопасная эксплуатация.

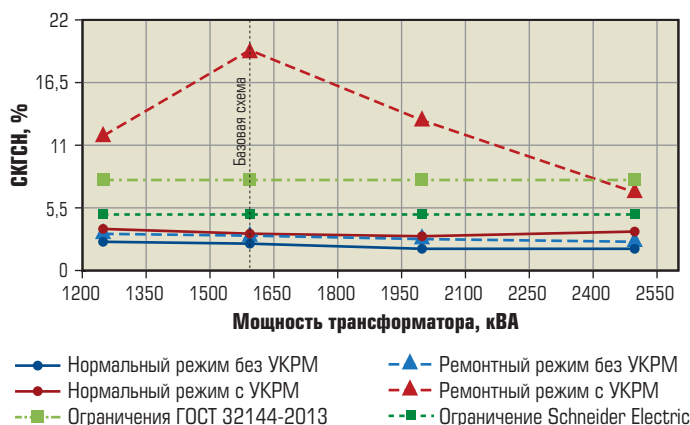


Рис. 4. Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения при изменении мощности трансформатора

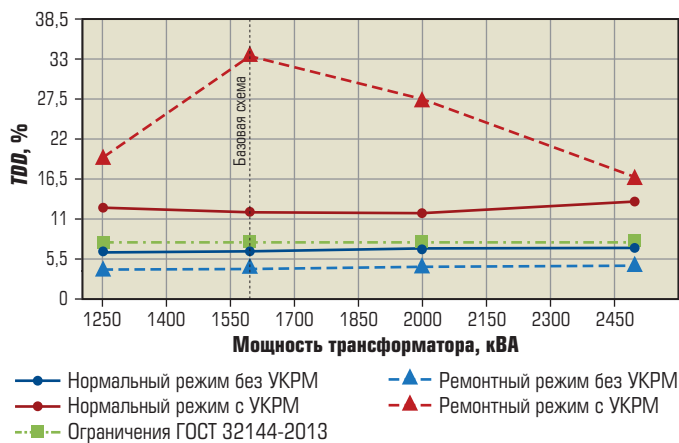


Рис. 5. Зависимость коэффициента Total demand distortion при изменении мощности трансформатора

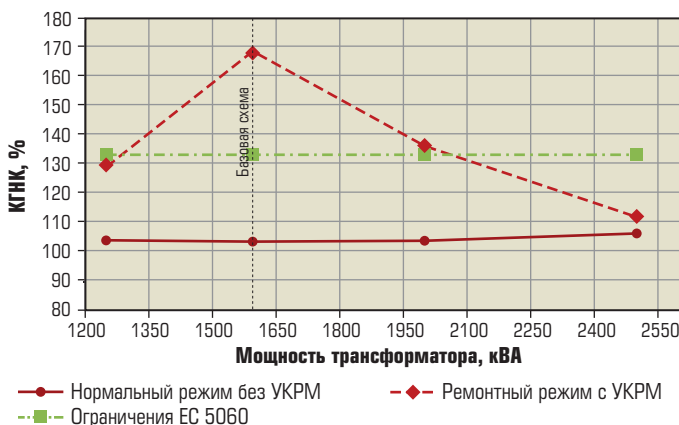


Рис. 6. Зависимость коэффициента гармонической нагрузки при изменении мощности трансформатора

Полученные результаты расчетов значений КГНК (рис. 6) повторяют зависимость, полученную при исследовании значений СКГСН на всем диапазоне изменения значений  $S_T$ .

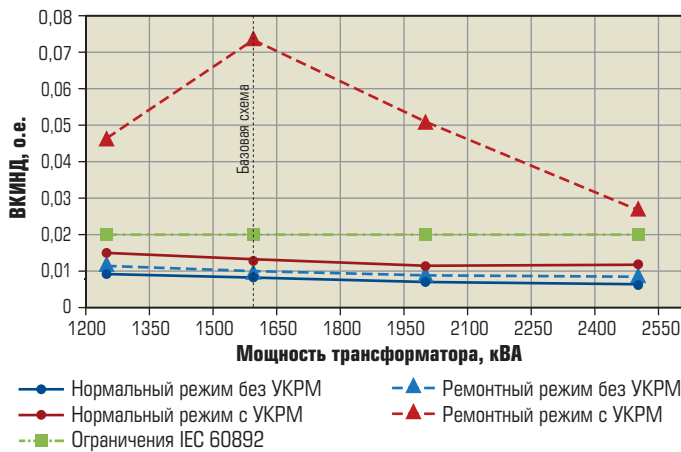


Рис. 7. Зависимость взвешенного коэффициента искажения при изменении мощности трансформатора

КГНК в нормальном и ремонтном режимах схем без учета УКРМ не рассматривается, так как равен нулю. В нормальном режиме схемы СЭС с учетом УКРМ на всем диапазоне изменения значений  $S_T$  значения КГНК соответствуют требованиям и находятся в диапазоне 103,16-105,88 %, что свидетельствуют о безопасной эксплуатации УКРМ. В ремонтном режиме схемы СЭС с учетом УКРМ на всем диапазоне изменения значений  $S_T$  значения КГНК находятся в интервале 111,03-167,81 % и не превышают допустимые пределы при значениях  $S_T$ , равных 1250 и 2500 кВА. Максимальное значение КГНК (167,81 %), которое превышает на 37,81 % допустимое значение, было выявлено для ремонтного режима схемы СЭС с учетом УКРМ вследствие возникновения параллельного резонанса на 7-ой гармонике при значении  $S_T$ , равном 1600 кВА. Значения КГНК для всего исследуемого диапазона значений  $S_T$ , за исключением значений  $S_T$ , равных 1250 и 2500 кВА, для ремонтного режима схемы СЭС с учетом УКРМ свидетельствуют о том, что при таком уровне несинусоидальности напряжения не обеспечивается безопасная эксплуатация УКРМ.

Полученные результаты расчетов значений ВКИНД (рис. 7) повторяют зависимость, полученную при исследовании значений СКГСН на всем диапазоне  $S_T$ . Для нормальной и ремонтной схем СЭС без учета УКРМ значения ВКИНД для всего диапазона изменения значений  $S_T$  находятся в диапазоне 0,0061-0,0112 %, что свидетельствует о безопасной эксплуатации АД согласно стандарту [31]. В нормальном режиме схемы СЭС с учетом УКРМ значения ВКИНД находятся в диа-

пазоне 0,0109-0,0146 о.е., что соответствует требованиям [31] и свидетельствует о его безопасной эксплуатации. В ремонтном режиме схемы СЭС на всем диапазоне изменения значений  $S_T$  значения ВКИНД находятся в диапазоне 0,0272-0,074 о.е., что превышает требования [31] и свидетельствует о сокращении срока службы АД при длительной его эксплуатации в данном режиме. Максимальное значение ВКИНД (0,074 о.е.), которое превышает на 0,054 о.е. допустимое значение [31], было выявлено для ремонтного режима схемы СЭС с учетом УКРМ вследствие возникновения резонанса на 7-ой гармонике при значении  $S_T$ , равном 1600 кВА.

При анализе влияния гармонических искажений в схеме СЭС необходимо учитывать увеличение потерь в железе и меди в сухих трансформаторах, так как по мере возрастания частоты (начиная с 350 Гц) гармонический ток имеет тенденцию уплотняться на поверхности проводников вследствие проявления скин-эффекта. В этих условиях уменьшается поперечное сечение проводников для протекания тока, следовательно, возрастают Джоулевы потери, которые приводят к увеличению нагрева и, как следствие, к сокращению срока службы трансформатора при его загрузке более 70-75 % [2, 32].

Для оценки негативного влияния ВГ на сухие трансформаторы решено использовать коэффициент  $k-factor$ , который позволяет проводить анализ фактической загрузки трансформатора с учетом гармонической составляющей нагрузки на основе методики, предложенной компанией *ABB* [33].

Так, например, согласно данной методике при определенном уровне ВГ в схеме СЭС получено расчётное значение коэффициента  $k-factor$ , равное 17 о.е. Данное значение свидетельствует о необходимости снижения номинального значения мощности  $S_T$  (1600 кВа) до расчетного значения согласно (4), опираясь на значение коэффициента допустимой загрузки сухого трансформатора с учетом ВГ ( $kzk-factor$ ). В итоге получим, что максимально допустимая мощность силового трансформатора с учетом ВГ ( $S_T k-factor$ ) при значении  $k-factor$ , равном 17 о.е., составит 1250 кВА. При обеспечении загрузки силового трансформатора ниже данного значения как в нормальном, так и в ремонтном режиме работы схемы СЭС, будет обеспечена его допустимая температура, и как следствие, его установленный нормативный срок эксплуатации.

$$S_{T_{k-factor}} = \frac{S_T}{k_{3-factor}}, \quad (4)$$

Также необходимо отметить, что в случае получения расчетного значения  $k-factor \leq 2.00$  согласно методике [33], снижение мощности сухого трансформатора в сети СЭС НПП содержащей нелинейную нагрузку не требуется.

Расчет нормального режима работы схемы СЭС с учетом УКРМ показал, что для значений мощностей  $S_T$ , равных 1250, 1600 и 2000 кВА, значения  $k-factor$  (рис. 8) находятся в диапазоне 1,6-1,7 о.е., что свидетельствует об отсутствии необходимости снижения мощности  $S_T$ . При значении мощности  $S_T$ , равном 2000 кВА, значение  $k-factor$  равняется 2.2, что свидетельствует о необходимости снижения номинального значения мощности  $S_T$  (2000 кВа) до расчетного значения  $S_T k-factor$  (1950 кВа). Благодаря выполнению условий:  $k-factor < 2$  и  $kзТ < kзk-factor$  для значений мощностей  $S_T$ , равных 1250, 1600 и 2000 кВА, и  $kзТ < kзk-factor$  для значения мощности  $S_T$ , равного 2000 кВА, обеспечивается безопасная эксплуатация сухого трансформатора с учетом текущего уровня ВГ в нормальном режиме работы схемы СЭС с учетом УКРМ и не требуется снижение мощности  $S_T$ .

Расчет ремонтного режима работы схемы СЭС без учета УКРМ показал, что для всего диапазона вариации значений мощностей  $S_T$ , значения  $k-factor$  (рис. 9) находятся в диапазоне 1,11-1,13 о.е., что свидетельствует об отсутствии необходимости снижения мощности  $S_T$ . Благодаря выполнению условий:  $k-factor < 2$  и  $kзТ < kзk-factor$  обеспечивается безопасная эксплуатация сухого трансформатора с учетом текущего уровня ВГ в ремонтном режиме работы схемы СЭС без учета УКРМ.

Расчет ремонтного режима работы схемы СЭС с учетом УКРМ показал, что для всего диапазона вариации значений мощностей  $S_T$ , значения  $k-factor$  (рис. 8) находятся в диапазоне 2,2-5,71 о.е., что свидетельствует о необходимости снижения номинальных значений мощностей  $S_T$  (1250; 1600; 2000; 2500 кВа) до расчетных значений мощностей  $S_T k-factor$  (1213,41; 1472,27; 1885,94; 1885,94 кВа). Благодаря выполнению условий:  $kзТ < kзk-factor$  для значений мощностей  $S_T$ , равного 1600, 2000 и 2500 кВА, обеспечивается безопасная эксплуатация сухого трансформатора с учетом текущего уровня ВГ в ремонтном режиме

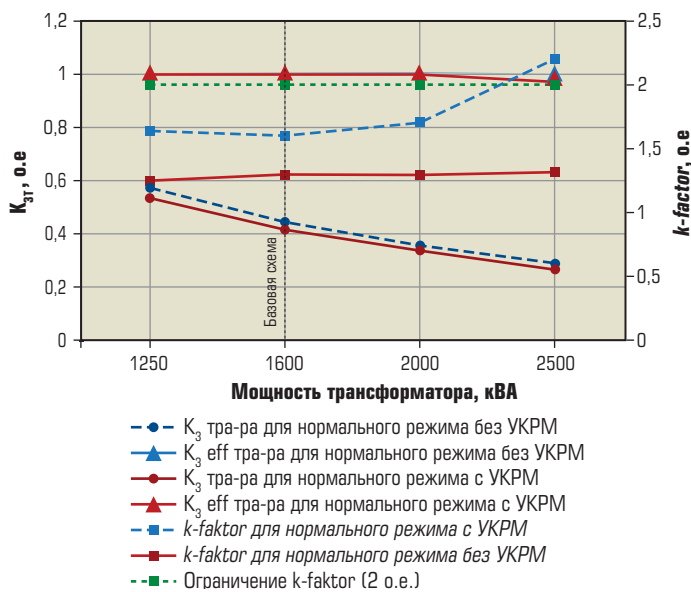


Рис. 8. Анализ коэффициента загрузки трансформатора для нормальных режимов схемы СЭС

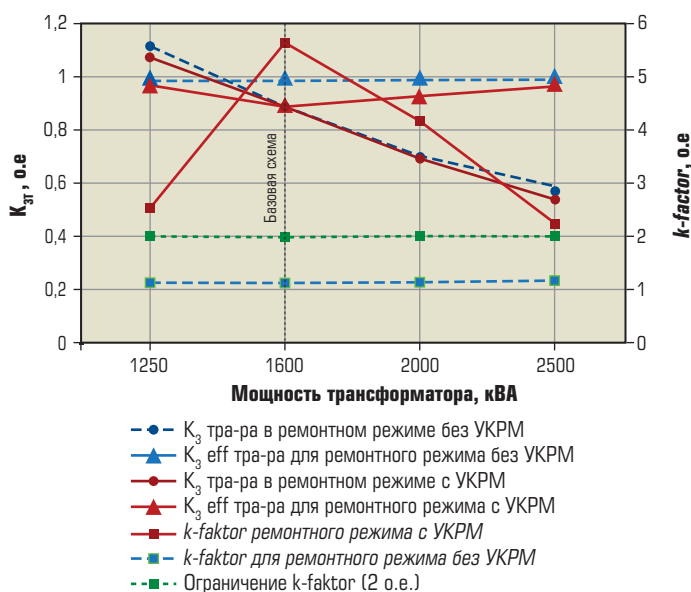


Рис. 9. Анализ коэффициента загрузки для ремонтных режимов схемы СЭС

работы схемы СЭС с учетом УКРМ и не требуется снижение их мощностей  $S_T$ . Для значения мощности  $S_T$ , равного 1250 кВА, вследствие выполнения условия  $kзТ (1,09 о.е.) > kзk-factor (0,97 о.е.)$  не обеспечивается безопасная эксплуатация сухого трансформатора с учетом текущего уровня ВГ в ремонтном режиме работы схемы СЭС с учетом УКРМ и для обеспечения установленного нормативного срока его эксплуатации требуется снижение фактической загрузки трансформатора ниже 0,97 о.е.



## ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно констатировать:

1. Увеличение значений мощностей  $S_T$  приводит к уменьшению уровня гармонических искажений в нормальном и ремонтном режимах схемах СЭС без учета УКРМ.
2. Изменение значений мощностей  $S_T$  для нормального и ремонтного режимов работы СЭС с учетом УКРМ приводит к возникновению параллельного резонанса на 7-ой гармонике.
3. Выявлена необходимость снижения мощности трансформатора при наличии нелинейной нагрузки в СЭС, что означает необходимость применения трансформаторов с более высокими номинальными параметрами для обеспечения нормативного срока эксплуатации.
4. Для всех режимов СЭС с учетом УКРМ выявлено отклонение соответствию требованиям стандартов для единичных значений мощностей  $S_T$  между показателями нормирования. Данные отклонения свидетельствуют о наибольшей чувствительности к уровню несинусоидальности у  $TDD$  и о наименьшей чувствительности у КГНК.
5. Для обеспечения безопасной эксплуатации силового электрооборудования в случае изменения значений мощностей  $S_T$  схемы СЭС с учетом и без учета УКРМ рекомендуется проводить анализ уровня несинусоидальности, основываясь на показателе нормирования гармонических составляющих тока  $TDD$ . Для анализа влияния ВГ на сухие трансформаторы применять уточняющий коэффициент  $k$ -factor с учетом проверки условия  $k3T < k3k$ -factor.

## Список литературы

1. *Хачатурян В.А.* Управление электроснабжением нефтеперерабатывающих предприятий в условиях массового применения регулируемого электропривода. – СПб., 2002, 64 с.
2. *Еришов М.С., Чернев М.Ю.* Определение и оценка показателей эмиссии гармонических составляющих токов от низковольтных асинхронных частотно-регулируемых приводов. // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2019, № 1, с. 59-64.
3. *Малькова Н.Е., Мензуренко К.С., Старов А.В., Крюков О.В.* Анализ надежности электроснабжения предприятий ТЭК с нелинейными потребителями // Автоматизация в энергетике. 2021, № 7(144), с. 38-45.
4. *Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В.* Электроприводы на основе машины двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
5. *Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В., Титов В.Г.* Реализация капсулированных электроприводных ГПА // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2020, т. 63, № 1, с. 31-37.
6. *Воронков В.И., Рубцова И.Е., Крюков О.В.* Электроснабжение и электрооборудование линейных потребителей МГ // Газовая промышленность. 2010, № 3, с. 32-37.
7. *Крюков О.В., Серебряков А.В.* Экологические направления электроснабжения и задачи энергосбережения при реконструкции объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015, № 8, с. 23-33.
8. *Kryukov O.V., Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Saffonov Y.M., Fedortsov N.N., Kostin A.A.* Intelligent control of electric machine drive systems // В сб.: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 – Conference Proceedings 10. 2018, p. 8571670.
9. *Elsharif A., Fetouh T., Shaaban H.* Harmonic Analysis of Radial Distribution Systems Embedded Shunt Capacitors // Renewable Energy and Sustainable Development journal. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apc.aast.edu/ojs/index.php/RESJ/article/view/03.1.046>
10. *Крюков О.В.* Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005, № 4, с. 39-44.
11. *Репин Д.Г., Крюков О.В.* Концепты системы мониторинга технического состояния компрессорных станций // Контроль. Диагностика. 2017, № 12, с. 30-35.
12. *Kryukov O.V., Serebryakov A.V.* Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. 2017, b. 17, № 3, p. 102-110.
13. *Крюков О.В., Серебряков А.В.* Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016, с. 286-290.
14. *Васенин А.Б., Крюков О.В.* Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: Великие реки"2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГА-СУ. 2017, с. 93-96.
15. *Кислов А.А., Смирнова Т.В., Хухрянкин Г.В., Крюков О.В.* Нормирование гармонического состава напряжения и тока для узлов нагрузки системы электроснабжения // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2021, № 8 (145), с. 24-33.

16. *Крюков О.В., Степанов С.Е.* Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Шербакова. 2013, с. 29-32.
17. *IEEE Std 399-1997* – IEEE Recommended Practice for Power System Analysis (IEEE Brown Book) // International standard, 1997.
18. *РД 153-34.0-15.502-2002.* Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии – М.: Энергосервис. 2003, 64 с.
19. *EREC G5/4-1.* Planning Levels for harmonic Voltage Distortion and the Connection of Non-Linear Equipment to Transmission Systems and Distribution Networks in the United Kingdom + Appendix B, // International standard, 2005.
20. *Крюков О.В.* Моделирование и микропроцессорная реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015, № 3, с. 55-61.
21. *Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V.* Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // В сборнике: Proceedings – 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019, с. 444-449. DOI: 10.1109/summa48161.2019.8947487.
22. *Воеков В.Н., Мещеряков В.Н., Крюков О.В.* Вентильный электропривод для погружных нефтяных насосов с импульсным повышающим преобразователем напряжения в звене постоянного тока ПЧ и релейным управлением инвертором напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020, т. 20, № 2, с. 110-119.
23. *Kryukov O.V., Serebryakov A.V.* Modern systems of outdoor illumination for compressor stations // Light & Engineering. 2016, т. 24, № 2, с. 128-131.
24. *Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В.* Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017, с. 153-158.
25. *Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplyukhov D.Y.* Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019, b. 90, № 7, p. 473-478.
26. *Крюков О.В.* Коммуникационная среда передачи данных сети ETHERNET на полевого уровне различных объектов // Автоматизация в промышленности. 2012, № 12, с. 26-30.
27. *IEEE Std 519-2014* IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems // International standard, 2014.
28. *ГОСТ 32144-2013* Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения” – М.: Стандартинформ. 2014, 39 с.
29. *IEC/TR 61000-3-6(2008)* Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems // International standard, 2008.
30. *IEC 1000-3-6* Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems – Basic EMC publication // International standard, 1996.
31. *ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009* Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей – М.: Стандартинформ. 2011, 26 с.
32. *Гендельман Б., Кричевский М.* Параметры и устройства для мониторинга качества электроэнергии. Роль качества токов в современной энергетике // Компания SATEC Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://satec-global.ru/upload/parametri-ke.pdf>
33. *Loading transformers with non sinusoidal currents.* K Factor // ABB. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://library.e.abb.com/public/be0cadaf6a6708fcc1257792005162cb/ Loading\\_transformers\\_with\\_non\\_sinusoidal\\_currents\\_KFactor.pdf](https://library.e.abb.com/public/be0cadaf6a6708fcc1257792005162cb/Loading_transformers_with_non_sinusoidal_currents_KFactor.pdf)

**ООО “ТСН-электрон”, г. Н. Новгород:**

*Липаткин Александр Васильевич* – инженер-проектировщик;

*Горохова Наталья Борисовна* – инженер-проектировщик;

*Тащилин Илья Юрьевич* – инженер-проектировщик;

*Крюков Олег Викторович* – докт. техн. наук, заместитель директора по науке.

**Липецкий государственный технический университет:**

*Мещеряков Виктор Николаевич* – докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Электропривод”.