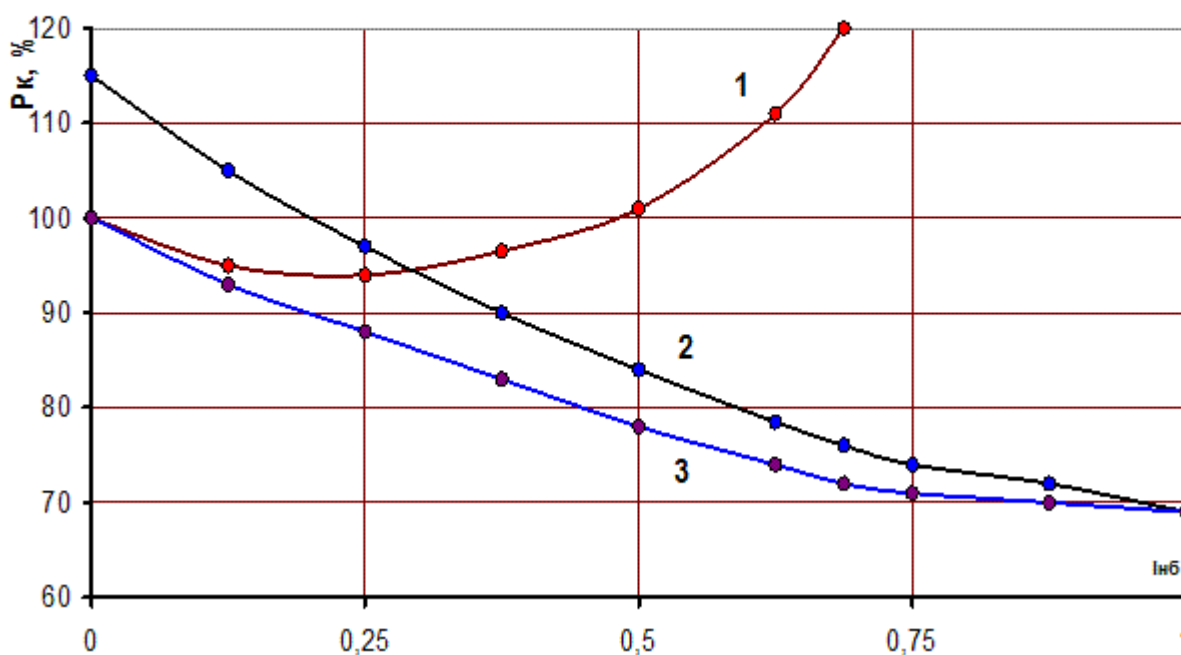


ТМГ с симметрирующим устройством ТМГсу

Одной из главных задач электроснабжения является обеспечение качества выходных напряжений распределительных трансформаторов, удовлетворяющих требования ГОСТ 13109–87 при всевозможных нормальных режимах их работы, а также решение этой задачи с минимальными издержками.

В четырехпроводных электрических сетях 0,38 кВ России и других стран СНГ в основном используются трансформаторы со схемой соединения обмоток "звезда–звезда–нуль" (У/Ун). Однако, эти самые дешевые в изготовлении трансформаторы в эксплуатации экономичны лишь при симметричной нагрузке фаз. Реально в сетях с большим удельным весом однофазных нагрузок равномерность их подключения во времени пофазно нарушается и потери электрической энергии в таких трансформаторах резко возрастают. На рисунке 1 показаны зависимости потерь короткого замыкания P_k трансформатора ТМ 100/10 при различных схемах соединения обмоток от величины тока в нулевом проводе, при $I_b = I_c = I_n$ и $I_a = 0 - I_n$. Из рисунка следует, что в трансформаторах У/Ун с увеличением тока $I_{нб}$ резко растут потери P_k .

Рисунок 1. Зависимость потерь короткого замыкания трансформатора ТМ 100/10 от схем соединения обмоток и величины тока в нулевом проводе ($3I_0$): 1 – трансформатор У/Ун; 2 – трансформатор У/Зн; 3 – трансформатор У/Ун с СУ.



Этот рост обусловлен появлением потоков нулевой последовательности (Φ_0) в магнитных системах трехфазных трансформаторов У/Ун, создаваемых токами небаланса $I_{нб}$ (равных $3 I_0$), протекающих в нулевом проводе сети. Φ_0 носят характер потоков рассеяния, аналогичных потокам короткого замыкания $\Phi_{кз}$, но по величине они значительно больше, о чем, в частности, позволяют судить соотношения полных сопротивлений Z_0 и $Z_{кз}$. Экспериментальные данные показывают, что Z_0 больше $Z_{кз}$ в 5 – 8, а для некоторых конструкций трансформаторов – в 12 и более раз.

Неизбежным последствием неравномерности нагрузки фаз в сетях с трансформаторами У/Ун является резкое искажение системы фазных напряжений (на практике это называют смещением нулевой точки). Как следствие – увеличение потерь также и в линиях 0,38 кВ.

Искажение фазных напряжений в реальных условиях эксплуатации нередко вызывает такое их отклонение уже на низковольтных вводах трансформатора, которое значительно превышает нормы ГОСТ на качество электроэнергии. В конце линий, по данным исследований, это отклонение напряжений приблизительно в два раза выше. При указанном качестве питания токоприемников, повышение в них потерь электроэнергии и отказы в работе, в том числе у бытовых приборов (холодильников и т.п.), вполне естественно. К сожалению, до настоящего времени целенаправленных работ по данным вопросам проводилось недостаточно, однако, как показывает практика, экономический урон от искажения напряжений у токоприемников огромен.

Завышение установленной мощности трансформаторов У/Ун, сверх требуемой по расчету (для понижения несимметрии напряжения), дает незначительный эффект, зато повышение потерь электроэнергии в сети дает значительное.

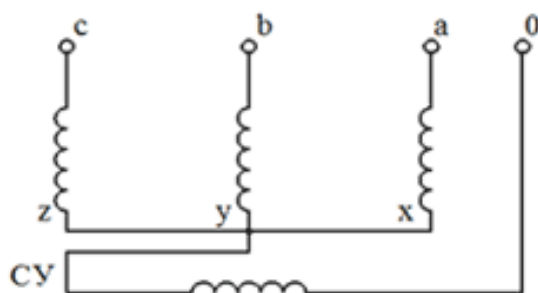
Кроме того токи нулевой последовательности, при несимметрии нагрузки, в магнитной системе трансформатора У/Ун создают потоки нулевой последовательности, которые замыкаясь через его бак, дно, крышку разогревают их, ухудшая охлаждение активной части. Это повышает температуру изоляции обмоток сверх нормы и трансформатор, при суммарной нагрузке ниже номинальной, оказывается перегруженным. Такое положение объективно вызывает необходимость в увеличении номинальной мощности трансформатора на одну, а иной раз на две ступени больше необходимой (расчетной) со всеми вытекающими последствиями.

Для устранения указанных недостатков кафедрой электроснабжения сельского хозяйства БАТУ, Минским электротехническим заводом им. В.И. Козлова и Минскэнерго разработано специальное новое симметрирующее устройство (СУ), которое является неотъемлемой частью трансформатора со схемой У/Ун.

Симметрирующее устройство представляет собой отдельную обмотку, уложенную в виде банджа поверх обмоток высшего напряжения трансформатора со схемой соединения обмоток У/Ун. Обмотка симметрирующего устройства рассчитана на длительное по ней протекание номинального тока трансформатора, т.е. на полную номинальную однофазную нагрузку.

Обмотка симметрирующего устройства включена в расщепку нулевого провода трансформатора из расчета того, что при несимметричной нагрузке и появлении тока в нулевом проводе трансформатора, а также связанного с ним потока нулевой последовательности, поток, создаваемый симметрирующим устройством равный по величине и направленный в противоположном направлении, компенсирует действие потока нулевой последовательности, предотвращая этим самым перекося фазных напряжений.

Схема подсоединения обмотки симметрирующего устройства (СУ) к обмоткам НН:



Трансформаторы с СУ улучшают работу защиты, повышают безопасность электрической сети. В них резко снижено разрушающее воздействие на обмотки токов при однофазных коротких замыканиях.

СУ значительно улучшает синусоидальность напряжения при наличии в сети нелинейных нагрузок, что крайне важно при питании многих чувствительных приборов, например, эвм, автоматики, телевизоров.

Таблица сравнительных характеристик трансформаторов ТМГ и ТМГСУ напряжением 6 – 10/0,4 кВ, схема и группа соединения обмоток У/Ун-0:

	Мощность, кВА	Потери, кВт		Габаритные размеры, мм			Zo, Ом	Масса, кг
		хх	кз	L	B	H		
ТМГ	25	0,115	0,6	800	640	930	4,05	240
ТМГСУ	25	0,115	0,6	900	530	930	1,316	280
ТМГ	40	0,155	0,88	840	680	1000	2,72	300
ТМГСУ	40	0,155	0,88	900	560	1000	0,82	370
ТМГ	63	0,22	1,28	950	730	1020	1,905	420
ТМГСУ	63	0,22	1,28	950	730	1020	0,63	420
ТМГ11	100	0,29	1,97	935	730	1060	1,3	490
ТМГСУ	100	0,27	1,97	1000	720	1180	0,361	540
ТМГ11	160	0,41	2,6	1020	755	1245	1,06	670
ТМГСУ11	160	0,41	2,6	1060	725	1200	0,27	660
ТМГ11	250	0,57	3,7	1140	820	1270	0,56	920
ТМГСУ11	250	0,57	3,7	1170	840	1270	0,197	920

Энергетические характеристики трансформаторов (потери короткого замыкания, холостого хода и др.) от наложения симметрирующего устройства практически не меняются, но при этом значительно сокращаются потери электроэнергии в сети. Система же фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз симметрируется приблизительно как при схеме соединения обмоток У/Зн.

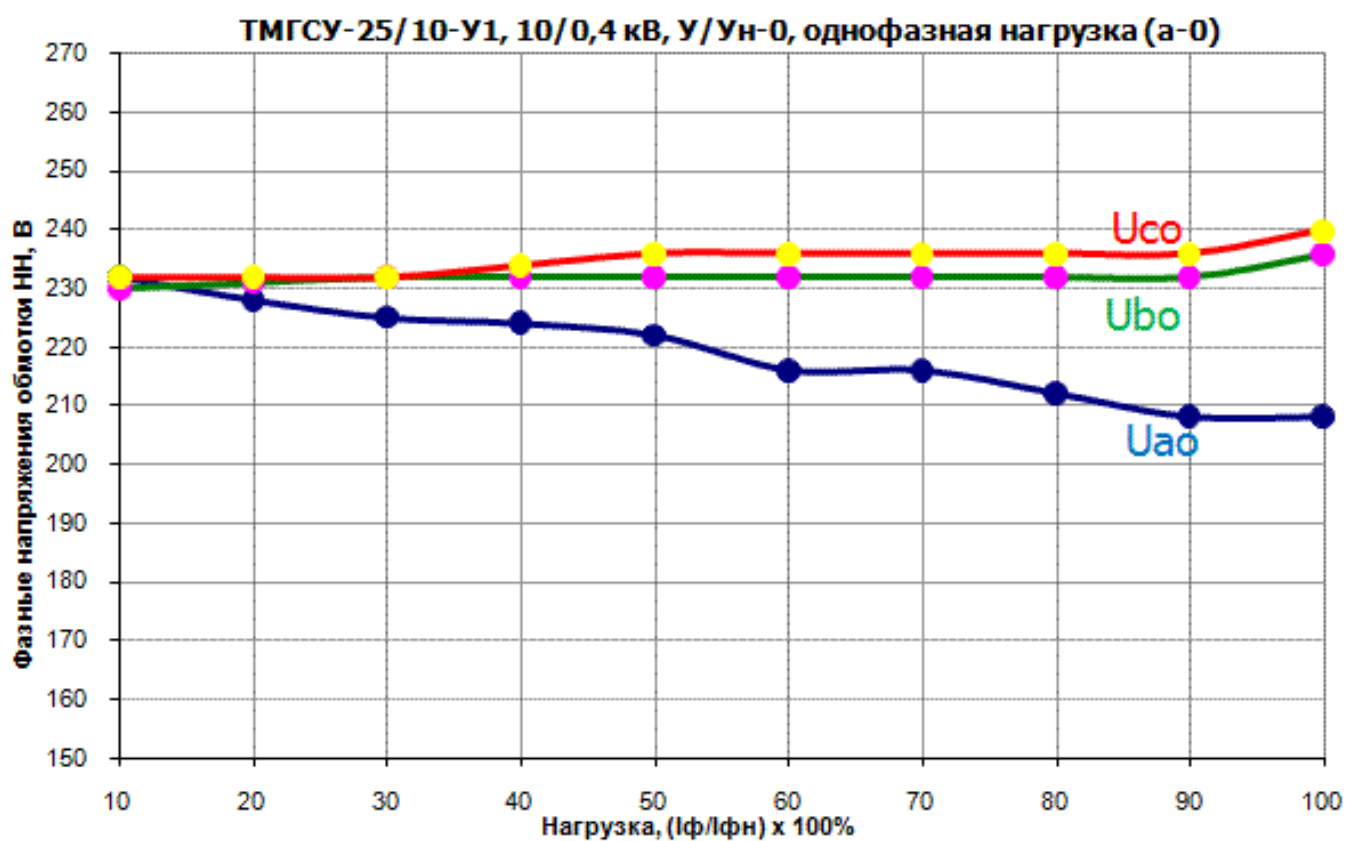
Это наглядно демонстрируют сравнительные испытания трансформаторов ТМГСУ-25/10-У1 и ТМГ-25/10-У1 в режиме однофазной и двухфазной нагрузки.

Результаты представлены в таблицах:

Однофазная нагрузка

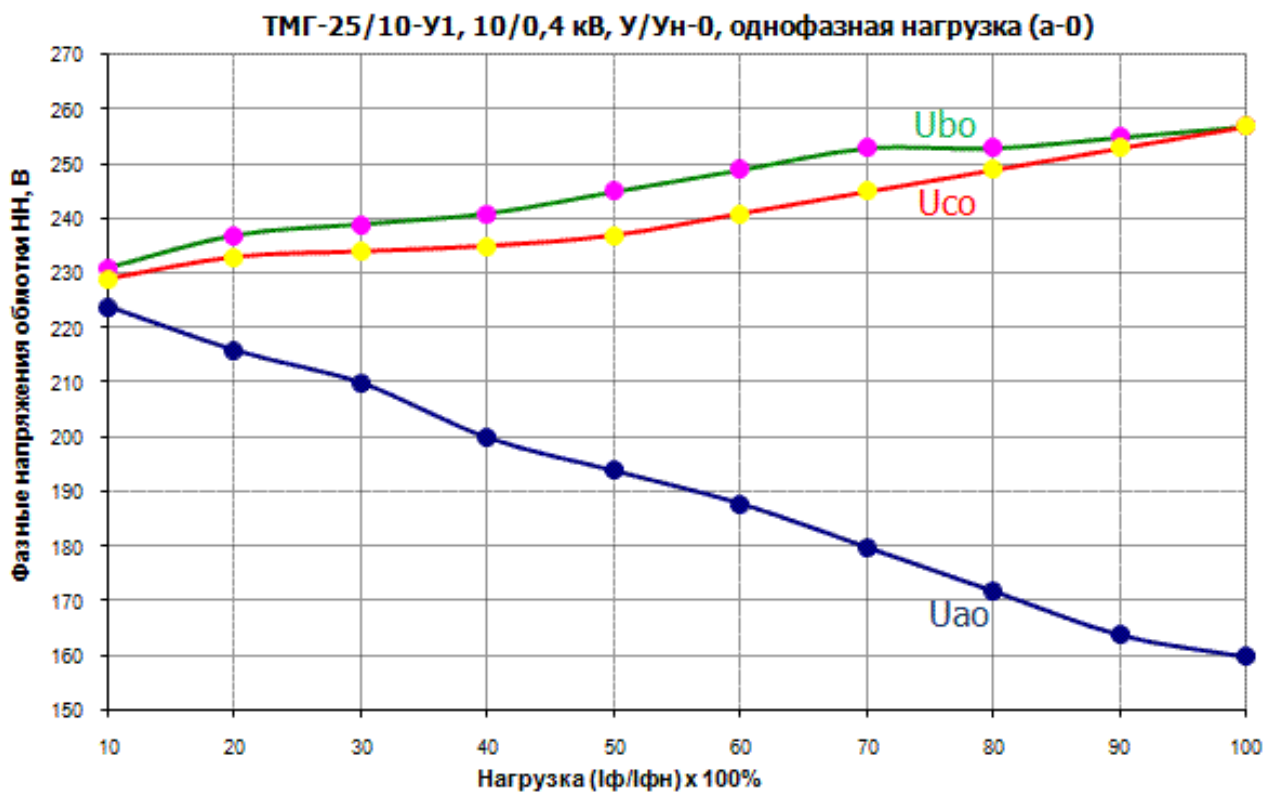
Трансформатор с СУ

И _{нн} , А фаза «а»	U _{аб} , В	U _{вс} , В	U _{ас} , В	U _{ао} , В	U _{бо} , В	U _{со} , В
3,61	402	398	398	232	230	232
7,22	402	398	398	228	231	232
10,83	400	398	398	225	232	232
14,44	400	400	396	224	232	234
18,05	400	400	394	222	232	236
21,66	400	400	392	216	232	236
25,27	400	396	388	216	232	236
28,88	396	400	388	212	232	236
32,49	396	400	389	208	232	236
36,1	400	404	388	208	236	240



Трансформатор без СУ

И _{нн} , А фаза «а»	U _{аб} , В	U _{вс} , В	U _{ас} , В	U _{ао} , В	U _{бо} , В	U _{со} , В
3,61	404	404	396	224	231	229
7,22	400	404	396	216	237	233
10,83	400	404	394	210	239	234
14,44	396	404	392	200	241	235
18,05	394	404	390	194	245	237
21,66	392	403	389	188	249	241
25,27	390	403	388	180	253	245
28,88	388	403	384	172	253	249
32,49	384	403	380	164	255	253
36,1	384	402	380	160	257	257

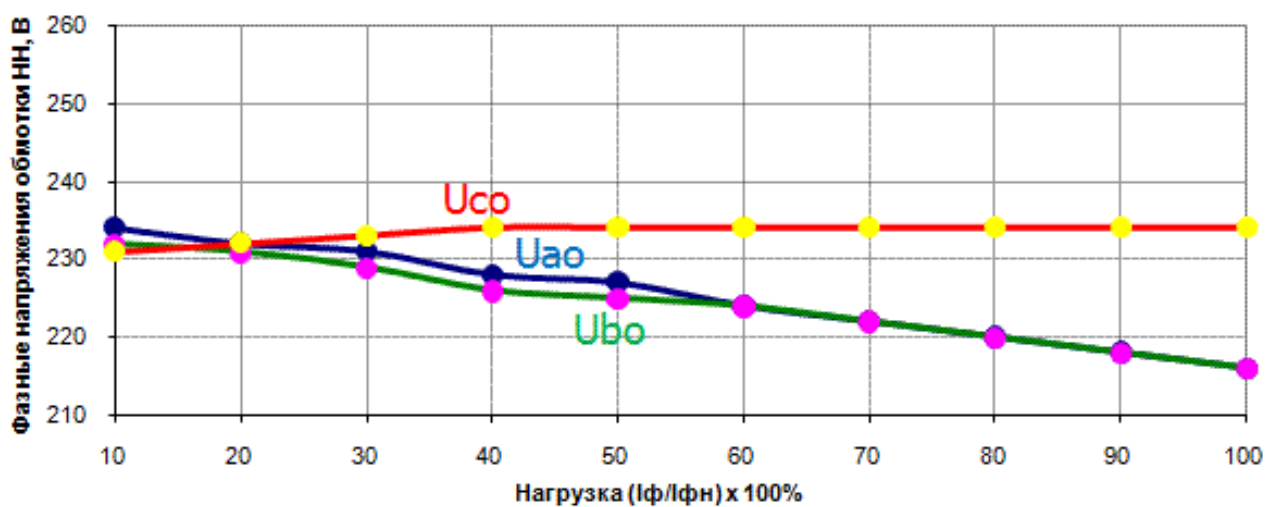


Двухфазная нагрузка

Трансформатор с СУ

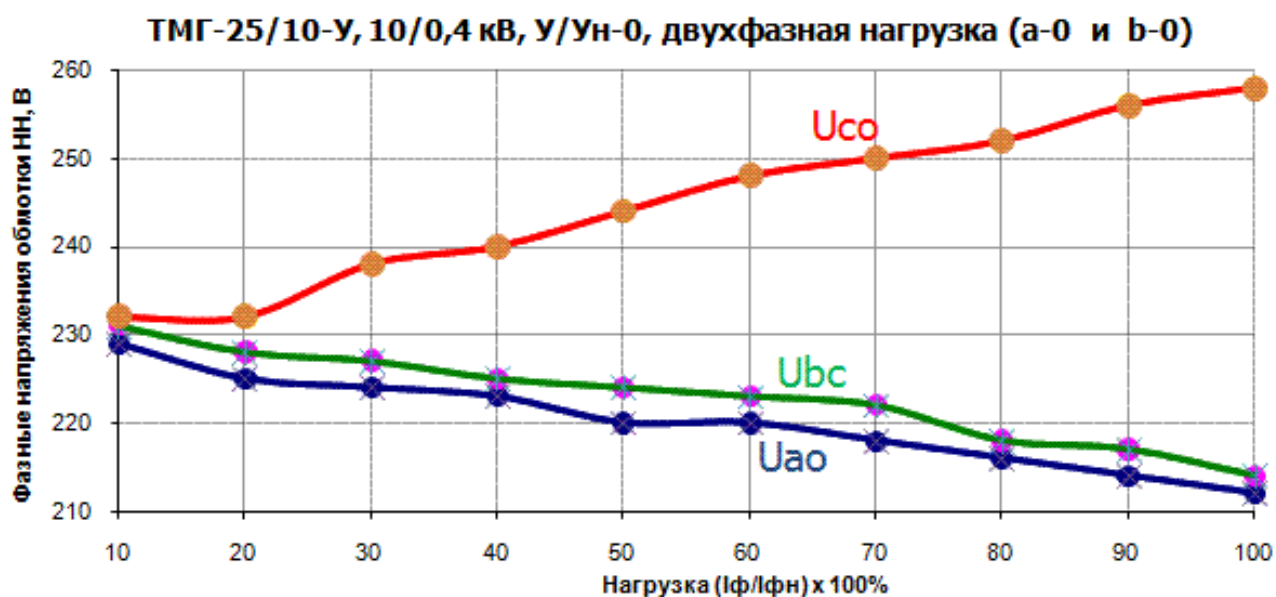
И _{нн} ,А фаз а,в	U _{аб} ,В	U _{bc} ,В	U _{ac} ,В	U _{ао} ,В	U _{bo} ,В	U _{co} ,В
3,61	408	404	406	234	232	231
7,22	402	402	404	232	231	232
10,83	400	402	402	231	229	233
14,44	396	402	402	228	226	234
18,05	392	400	400	227	225	234
21,66	388	400	396	224	224	234
25,27	384	400	396	222	222	234
28,88	380	400	394	220	220	234
32,49	380	400	392	218	218	234
36,1	376	400	392	216	216	234

ТМГСУ-25/10-У, 10/0,4 кВ, У/Ун-0, двухфазная нагрузка (а-0 и b-0)



Трансформатор без СУ

И _{нн} , А фаз а, в	U _{аб} , В	U _{bc} , В	U _{ac} , В	U _{ао} , В	U _{bo} , В	U _{co} , В
3,61	400	401	398	229	231	232
7,22	396	400	396	225	228	232
10,83	396	400	400	224	227	238
14,44	393	400	400	223	225	240
18,05	392	402	401	220	224	244
21,66	392	401	404	220	223	248
25,27	388	404	406	218	222	250
28,88	386	404	406	216	218	252
32,49	382	400	406	214	217	256
36,1	380	400	406	212	214	258



В настоящем докладе приведены результаты оценочных расчетов экономической эффективности использования в четырехпроводных электрических сетях 0,38 кВ Республики Беларусь трансформаторов с новой схемой соединения обмоток "звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством", исходя только из потерь электрической энергии в трансформаторах и линиях.

Проведенный анализ сетей РБ позволил определить среднестатистическую сеть 0,38 кВ со следующими параметрами: мощность трансформатора – 100 кВА (с учетом коммунально-бытовых потребителей в городах и городских поселках); длина линии – 0,8 км; количество линий на одной ТП – 3; сечение провода линии – 35 мм²; нагрузка линий 0,38 кВ принята пропорциональной мощности трансформатора, от которого она запитана, и считалась равномерно распределенной по всей длине линии; время использования максимума нагрузки в году – 2000 часов; величина тока в нулевом проводе 0,25 от номинального фазного.

Расчеты дополнительных потерь электрической энергии за счет несимметрии нагрузки были выполнены Белэнергосетьпроектом (г. Минск) по известным формулам с применением метода симметричных составляющих и использованием ЭВМ. Они производились в зависимости от величины тока в нулевом проводе, значения которого изменялось от 0 до 0,5 номинального фазного для трансформаторов мощностью от 25 до 250 кВА. Сечение нулевого провода принималось равным сечению фазных проводов.

Результаты расчетов сведены в таблице 1 (S_n – номинальная мощность трансформатора, кВА; $I_{нб}$ – ток в нулевом проводе (в относительных единицах); P_k – потери короткого замыкания, Вт (для трансформаторов со схемами соединения обмоток У/Ун, У/Зн, У/Ун с СУ); ΔP_l – дополнительные потери электроэнергии в линиях сети с трансформаторами У/Ун, У/Зн по сравнению с сетью с трансформаторами У/Ун с СУ; Q – годовая экономия электроэнергии в сетях с трансформаторами У/Ун с СУ по сравнению с сетями с трансформаторами У/Ун, У/Зн.

Табл. 1

Sn, кВА	Марка и сечение провода	I _{нб}	Рк, Вт			ΔРл, Вт		Q, кВт · ч	
			У/Ун	У/Зн	У/Ун с СУ	У/Ун	У/Зн	У/Ун	У/Зн
100	A35	0	1970	2265	1970	0	0	0	591
100	A35	0,1	1941	2127	1854	28	0	229	546
100	A35	0,2	2125	2014	1770	168	0	1026	488
100	A35	0,25	2278	1967	1739	307	–1	1693	454
100	A35	0,3	2492	1926	1716	509	–1	2569	418
100	A35	0,4	3073	1863	1693	1140	–2	5037	335
100	A35	0,5	3857	1825	1702	2150	–4	8609	238
25	A35	0,25	633	599	530	14	0	233	139
40	A35	0,25	979	878	777	48	0	501	203
63	A35	0,25	1450	1278	1130	115	0	871	295
160	A35	0,25	3272	2645	2339	828	–1	3521	611
250	A35	0,25	4665	3694	3266	1699	–2	6196	852

Сопоставление потерь в среднестатистической электрической сети при неравномерной нагрузке с трансформаторами со схемами соединения У/Ун, У/Зн, и У/Ун с СУ показывает, что наиболее экономичной из них является схема У/Ун с СУ.

Выполненные Белэнергосетьпроектом расчеты сроков его окупаемости в зависимости от величины тока в нулевом проводе дали результаты, приведенные в таблице 2.(ток небаланса указан в относительных единицах)

$I_{нб}$	Номинальная мощность трансформатора У/Ун СУ(Ш), кВА					
	25	40	63	100	160	250
0	0	0	0	0	0	0
0,1	13,5	7	5,1	4,7	2,9	1,9
0,2	3,2	1,7	1,2	1,0	0,6	0,4
0,25	2,0	1,0	0,7	0,6	0,4	0,2
0,3	1,4	0,7	0,5	0,4	0,2	0,2
0,4	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Из таблицы следует, что при среднестатистическом токе в нулевом проводе 0,25 от номинального фазного, симметрирующая обмотка только у трансформаторов Шн = 25 кВА окупается в срок 2 года и у Шн = 40 кВА в срок 1 год, для всех остальных мощностей окупаемость менее года.

Трансформаторы в среднем работают около 40 лет, отсюда не трудно определить прибыль предприятия, установившего в сетях 0,38 кВ с несимметричной нагрузкой фаз трансформаторы со схемой соединения обмоток У/Ун с СУ.

Использование в электрических сетях 0,38 кВ с несимметричной нагрузкой фаз трансформаторов ТМ и ТМГ со схемой У/Ун с СУ мощностью от 25 до 250 кВА, выпуск которых осуществляется на МЭТЗ им. В.И. Козлова, позволяет получить значительный экономический эффект только за счет сокращения ничем не оправданных потерь электроэнергии в линиях и трансформаторах.

Трансформаторы с симметрирующим устройством мощностью от 63 до 250 кВА разработаны и выпускаются в герметичном исполнении (типа ТМГ).

Внутренний объем таких трансформаторов не имеет сообщения с окружающей средой, они полностью заполнены маслом. Расширитель и воздушная или газовая «подушка» отсутствуют. Это значительно улучшает условия работы масла, исключает его увлажнение, окисление и шламообразование. Трансформаторное масло перед заливкой в трансформатор дегазируется. Благодаря этому масло своих свойств, практически не меняет в течение всего срока службы трансформатора, поэтому производить отбор пробы масла не требуется.

Трансформаторы в герметичном исполнении практически не требуют расходов на предпусковые работы и на обслуживание в процессе эксплуатации, не нуждаются в профилактических ремонтах и ревизиях в течение всего срока эксплуатации. Это позволит снизить непроизводственные расходы в течение всего срока эксплуатации трансформатора, в зависимости от его мощности, на 40 – 63 % его полной стоимости.