

УДК 621.314.213

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ И НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИМЕНЕНИЕМ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ»

М.А. Прищепов,

профессор каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

А.И. Зеленкевич,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

В.М. Збродыга,

зав. каф. электроснабжения БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В работе выполнена оценка экономической эффективности замены силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» на трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для снижения несинусоидальности и несимметрии напряжений.

Ключевые слова: трансформатор, потери активной мощности при несимметрии и несинусоидальности напряжения, схема соединения обмоток, кратность снижения срока службы, дополнительные капиталовложения, чистый дисконтированный доход.

The article evaluates the economic efficiency of replacing a power transformer with a "star-star with zero wire" winding connection scheme with a transformer with a "star-double zigzag with zero wire" winding connection scheme to reduce non-sinusoidality and voltage asymmetry.

Key words: transformer, active power losses in case of voltage asymmetry and non-sinusoidality, winding connection scheme, reduction degree of service life, additional investments, net discounted income.

Введение

Проведенный анализ известных исследований показал, что основными источниками несимметрии напряжений в электрических сетях являются несимметричность нагрузок потребителей, несимметрия элементов электрической сети и неполнофазные режимы работы электрооборудования. Источниками искажения синусоидальности кривой напряжения в системах электроснабжения являются потребители с нелинейными вольт-амперными характеристиками: преобразователи частоты на полупроводниковых элементах, сварочные трансформаторы, электродуговые печи, вентиляльные преобразователи, однофазные электродвигатели с регуляторами напряжения на базе тиристоров и др. Несимметричные режимы напряжений приводят к появлению токов обратной и нулевой последовательности, которые увеличивают значения суммарных токов в отдельных фазах элементов электрической сети, что вызывает увеличение потерь активной составляющей мощности, в том числе и в ЛЭП. Искажение синусоидальности кривой напряжения в системах электроснабжения обусловлено наличием высших гармонических составляющих напряжения. Величина высших гармонических составляющих зависит от значений соответствующих токов высших гармонических

составляющих. Большое влияние оказывают также частотные характеристики отдельных элементов электрической сети. Наличие высших гармонических составляющих на отдельных электроприемниках и в системе электроснабжения в целом обуславливает снижение в них эффективности процессов производства, передачи и потребления электроэнергии, ухудшение характеристик изоляции проводов и кабелей [1-9]. Протекающие по обмоткам трансформатора несинусоидальные токи, из-за явления поверхностного эффекта, приводят к увеличению значения активного сопротивления обмоток трансформатора и дополнительному их нагреву. Вихревые токи в обмотках трансформатора, причиной возникновения которых являются гармоники высоких частот, обуславливают дополнительные потери мощности, составляющие до 60-70 % в общих потерях. Это вызывает избыточный нагрев и снижение срока работы трансформатора.

С целью снижения несимметрии и несинусоидальности напряжений в сельских электрических сетях, обладающих сравнительно низкой плотностью и ярко выраженными пиками и провалами электрических нагрузок, эксплуатирующихся в условиях агрессивной внешней среды, наиболее целесообразным является применение относительно недорогих и надежных по конструктивному исполнению транс-

форматоров с разработанной авторами схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом», которая обеспечивает возможность параллельной работы с трансформаторами нулевой группы соединений обмоток, компенсирует магнитные потоки нулевой последовательности и магнитные потоки высших гармонических составляющих, кратных трем, в стали стержней магнитопровода [8; 10-13].

Целью работы является экономическая оценка эффективности применения силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для снижения несинусоидальности и несимметрии напряжений в сельских электрических сетях.

Основная часть

При экономической оценке эффективности замены силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» (Y/Y_n) на силовой трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» ($Y/2Z_n$) в сельских электрических сетях, рассмотрен эффект от снижения несинусоидальности и несимметрии напряжения применительно к самому массовому силовому трансформатору типа ТМГ мощностью 100 кВ·А на напряжение 10/0,4 кВ. Экономический эффект в линиях электропередачи и у потребителя не учитывался.

Технико-экономические показатели вычислялись для следующих вариантов:

1) – использование в электроснабжающей сети трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n (индекс 1);

2) – использование в электроснабжающей сети трансформатора с разработанной схемой соединения обмоток $Y/2Z_n$ (индекс 2).

При искажении симметрии и синусоидальности напряжения в трансформаторах возникают дополнительные потери активной мощности, согласно [14]:

$$\Delta P = \left(k' k_{2U}^2 + k'' \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05v^2}{v\sqrt{v}} U_v^2 \right) S_n, \quad (1)$$

где $k' = 2,67$, $k'' = 1,62$ – коэффициенты, величина которых зависит от назначения и уровня номинального напряжения электрооборудования, о.е.;

k_{2U} – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, о.е.;

U_v – величина относительного напряжения v -й гармоники, о.е.;

v – порядковый номер гармоники напряжения;

S_n – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Обусловленное несимметрией и несинусоидальностью напряжений снижение срока службы, определяется по формуле:

$$\gamma = e^{k_{иск}}, \quad (2)$$

где $k_{иск}$ – значение коэффициента искажения напряжения, о.е..

Для силовых трансформаторов, согласно [14], его значение равно:

$$k_{иск} = d' k_{2U}^2 + d'' \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05v^2 + \frac{1,7}{\sqrt{v}} U_v^2}{v\sqrt{v}}, \quad (3)$$

где $d' = 610$, $d'' = 207$ – коэффициенты, которые определяются исходя из назначения и номинального напряжения оборудования, о.е..

Эффективность снижения дополнительных потерь активной мощности от искажения симметрии и синусоидальности питающего напряжения в электрооборудовании равна:

$$\mathcal{E}_m = (\Delta P_1 - \Delta P_2) c_{\mathcal{E}} T_{\mathcal{E}}, \quad (4)$$

где $c_{\mathcal{E}}$ – стоимость электрической энергии, руб/кВт·ч;

$T_{\mathcal{E}}$ – время потерь, ч.

Величина потерь холостого хода P_x и короткого замыкания P_k , зависящая от соотношения длины окружности осевого канала между первичными и вторичными обмотками к высоте стержня магнитопровода β , магнитной индукции в стали магнитопровода, плотности токов в первичной и вторичной обмотках, материала проводников, в разработанном трансформаторе со схемой соединения обмоток $Y/2Z_n$ отличается от соответствующих потерь в трансформаторе со схемой соединения обмоток Y/Y_n . Эффект от изменения величины потерь в силовом трансформаторе определим по выражению:

$$\mathcal{E}_m = ((\Delta P_1 - \Delta P_2) + (P_{k1} - P_{k2}) + (P_{x1} - P_{x2})) c_{\mathcal{E}} T_{\mathcal{E}}, \quad (5)$$

где P_k – величина нормативных потерь холостого хода трансформатора, кВт;

P_x – величина нормативных потерь короткого замыкания трансформатора, кВт.

Величина ежегодных амортизационных издержек, которая включает издержки из-за снижения срока службы изоляционных материалов в трансформаторе, обусловленные некачественным напряжением, определяется по выражению [14]:

$$I_a = 0,094 K \gamma, \quad (6)$$

где K – капиталовложения в силовой трансформатор, руб.

Стоимость в Республике Беларусь силового трансформатора мощностью 100 кВА на напряжение 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Y_n бралась из открытых источников. Для трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/2Z_n$ стоимость принималась по результатам оптимизационных расчетов, проведенных авторами в источнике [15], при существующих значениях стоимости электроэнергии, алюминия и электротехнической стали.

Все другие составляющие эксплуатационных издержек приняты неизменными.

Величина дополнительных капитальных вложений при применении трансформатора со схемой соединения обмоток Y/2Z_н вместо схемы Y/Y_н равна, руб.:

$$\Delta K_{mp} = K_2 - K_1. \quad (7)$$

Годовой доход от замены силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» на разработанный трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» в сельских электрических сетях равен, руб.:

$$D_z = \mathcal{E}_m + (I_{a1} - I_{a2}). \quad (8)$$

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) от замены силового трансформатора, руб.:

$$ЧДД = \sum_{i=1}^n (D_{zi} \alpha_i) - \Delta K_{mp}, \quad (9)$$

где α_i – коэффициент дисконтирования, т.е. приведения к началу расчетного периода.

Коэффициент дисконтирования определяется по выражению, о.е.:

$$\alpha_i = \frac{(1+E)^T - 1}{E(1+E)^T}, \quad (10)$$

где E – банковская ставка долгосрочного кредитования, которая принималась равной ставке рефинансирования в Беларуси ($E=0,0775$), о.е.;

T – значение среднего амортизационного срока службы рекомендуемого трансформатора, лет.

Коэффициент возврата дополнительных капвло-

жений на замену силового трансформатора, о.е.:

$$P_g = \frac{\sum_{i=1}^n D_{zi}}{\Delta K_{mp}} - E. \quad (11)$$

Срок возврата дополнительных капитальных вложений на замену силового трансформатора, лет:

$$T_g = \frac{\lg(1 + \frac{E}{P_g})}{\lg(1 + E)}. \quad (12)$$

Расчеты производились при 30 %, 50 %, 70 % и 100 %-й загрузке трансформаторов для следующих режимов нагрузки:

1. Величина тока в одной из фаз изменялась в пределах от 0,0 до 1,2 I_n , а в двух других фазах была равна номинальному I_n ;

2. Величина тока в одной из фаз изменялась в пределах от 0,0 до 1,2 I_n , в другой фазе была равна нулю, в третьей фазе – номинальной I_n ;

3. Величина тока в одной из фаз изменялась в пределах от 0,0 до 1,2 I_n , а в двух других фазах была равна нулю.

Значения относительного напряжения v -й гармоники U_v при различной загрузке трансформаторов использовалось из проведенных авторами экспериментальных исследований [8; 13; 16, 17].

Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 1 и на рисунках 1-4.

Таблица 1. Техничко-экономические показатели

Степень загрузки трансформатора // I_n	Схема соединений	Дополнительные потери от некачественного напряжения ΔP , кВт	Стоимость суммарных потерь электроэнергии, руб.	Кратность снижения срока службы от некачественного напряжения γ , о.е.	Снижение стоимости суммарных потерь электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$, руб.	Годовой доход от замены трансформатора Дг, руб.	Чистый дисконтированный доход от замены трансформатора (ЧДД), руб.	Срок возврата капиталовложений Тв, лет
Режим 1 ($I_a = 0 \dots 1,2 I_n, I_b = I_n, I_c = I_n$)								
30%	Y/Y _н	0,14138	4901,5	1,436	168,72	202,43	1307,85	5,66
	Y/2Z _н	0,04113	4732,8	1,197				
50%	Y/Y _н	0,07918	4770,7	1,197	80,73	127,42	489,72	5,85
	Y/2Z _н	0,02078	4690,0	1,048				
70%	Y/Y _н	0,04195	4692,5	1,100	25,68	90,28	84,67	7,67
	Y/2Z _н	0,00974	4666,8	1,022				
100%	Y/Y _н	0,02181	4650,1	1,015	3,29	84,01	16,23	8,10
	Y/2Z _н	0,00025	4646,8	1,001				
Режим 2 ($I_a = 0, I_b = 0 \dots 1,2 I_n, I_c = I_n$)								
30%	Y/Y _н	0,12936	4876,2	1,342	139,24	165,1	900,8	4,72
	Y/2Z _н	0,04314	4737,0	1,103				
50%	Y/Y _н	0,06517	4741,3	1,160	48,25	106,8	264,9	6,73
	Y/2Z _н	0,02221	4693,0	1,052				
70%	Y/Y _н	0,13540	4888,9	1,361	156,04	174,9	1007,7	4,50
	Y/2Z _н	0,04118	4732,9	1,098				
100%	Y/Y _н	0,27374	5179,8	1,864	363,09	448,0	3 986,6	1,94
	Y/2Z _н	0,08104	4816,7	1,202				
Режим 3 ($I_a = 0, I_b = 0, I_c = 0 \dots 1,2 I_n$)								
30%	Y/Y _н	0,03923	4686,7	1,093	21,39	87,3	52,2	7,87
	Y/2Z _н	0,00905	4665,3	1,021				
50%	Y/Y _н	0,08103	4774,6	1,202	83,62	129,3	510,2	5,78
	Y/2Z _н	0,02125	4691,0	1,049				

Продолжение таблицы 1

Степень загрузки трансформатора //n	Схема соединений	Дополнительные потери от некачественного напряжения ΔP, кВт	Стоимость суммарных потерь электроэнергии, руб.	Кратность снижения срока службы от некачественного напряжения γ, о.е.	Снижение стоимости суммарных потерь электроэнергии ΔЭ, руб.	Годовой доход от замены трансформатора Дг, руб.	Чистый дисконтированный доход от замены трансформатора (ЧДД), руб.	Срок возврата капиталовложений Тв, лет
70%	Y/Yn	0,14148	4901,7	1,379	174,29	185,4	1122,4	4,28
	Y/2Zn	0,03858	4727,4	1,092				
100%	Y/Yn	0,26358	5158,4	1,821	355,14	434,4	3838,0	1,99
	Y/2Zn	0,07466	4803,3	1,185				

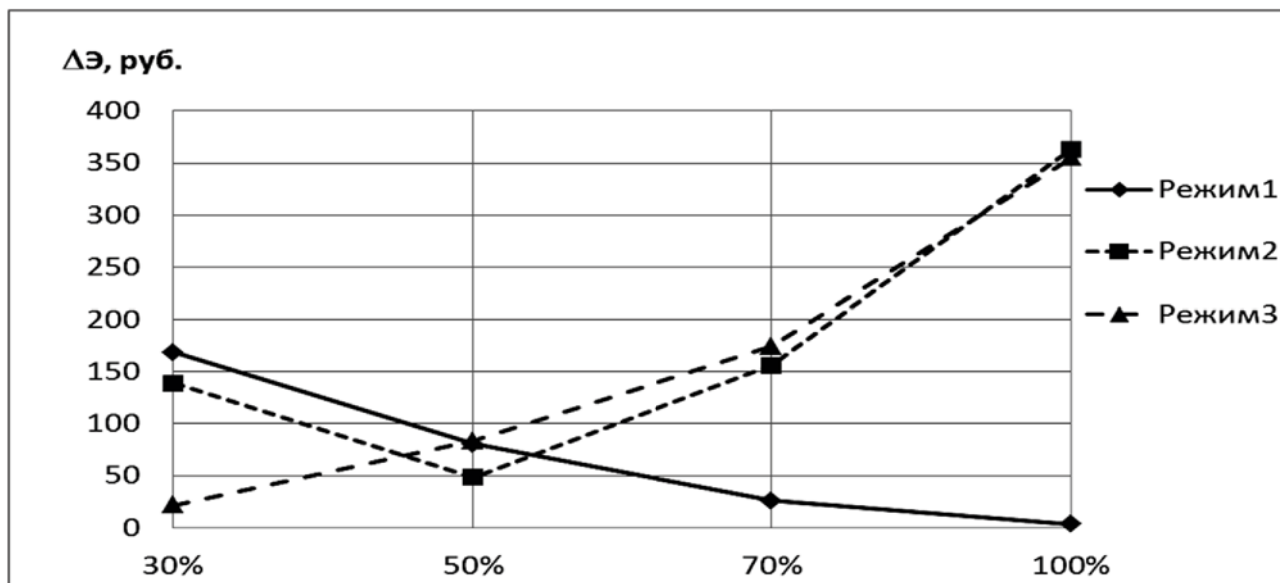


Рисунок 1. Зависимость снижения стоимости суммарных потерь электроэнергии ΔЭ от степени загрузки трансформатора для различных режимов при замене трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Yn на Y/2Zn

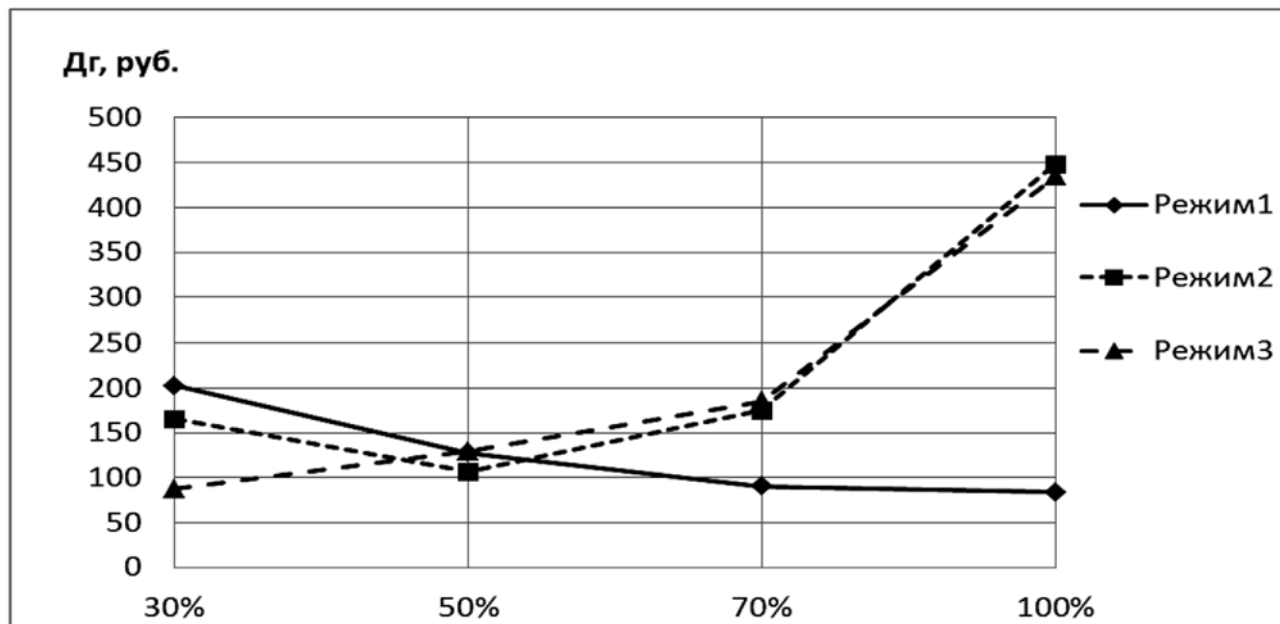


Рисунок 2. Зависимость годового дохода Дг от степени загрузки трансформатора для различных режимов при замене трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Yn на Y/2Zn

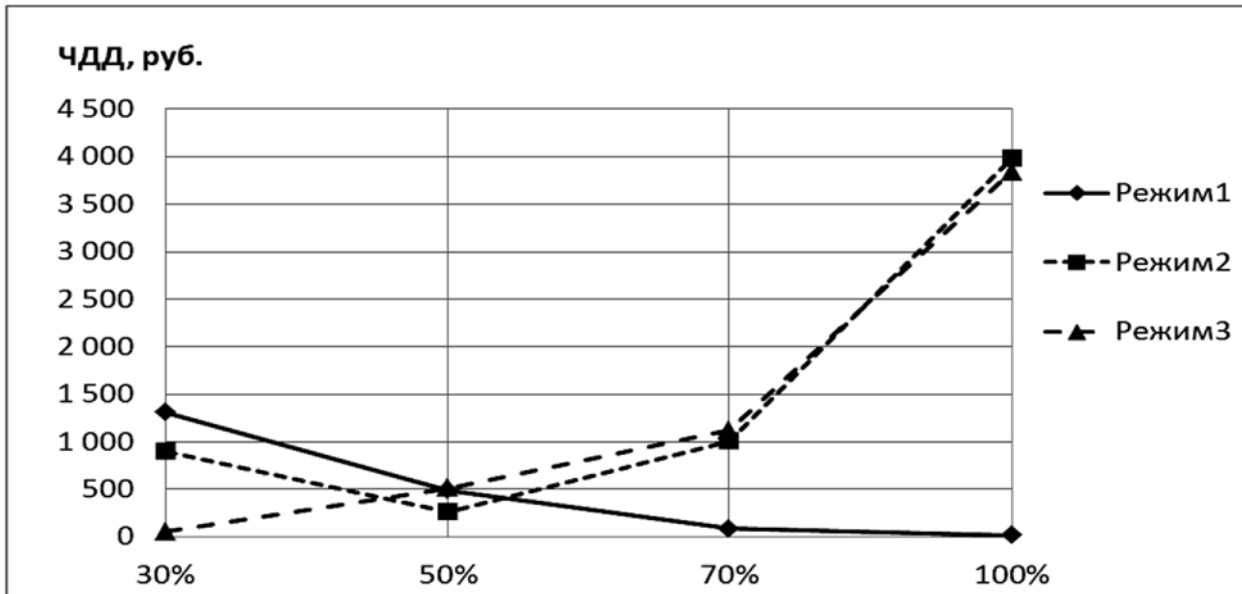


Рисунок 3. Зависимость чистого дисконтированного дохода ЧДД от степени загрузки трансформатора для различных режимов при замене трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n на $Y/2Z_n$

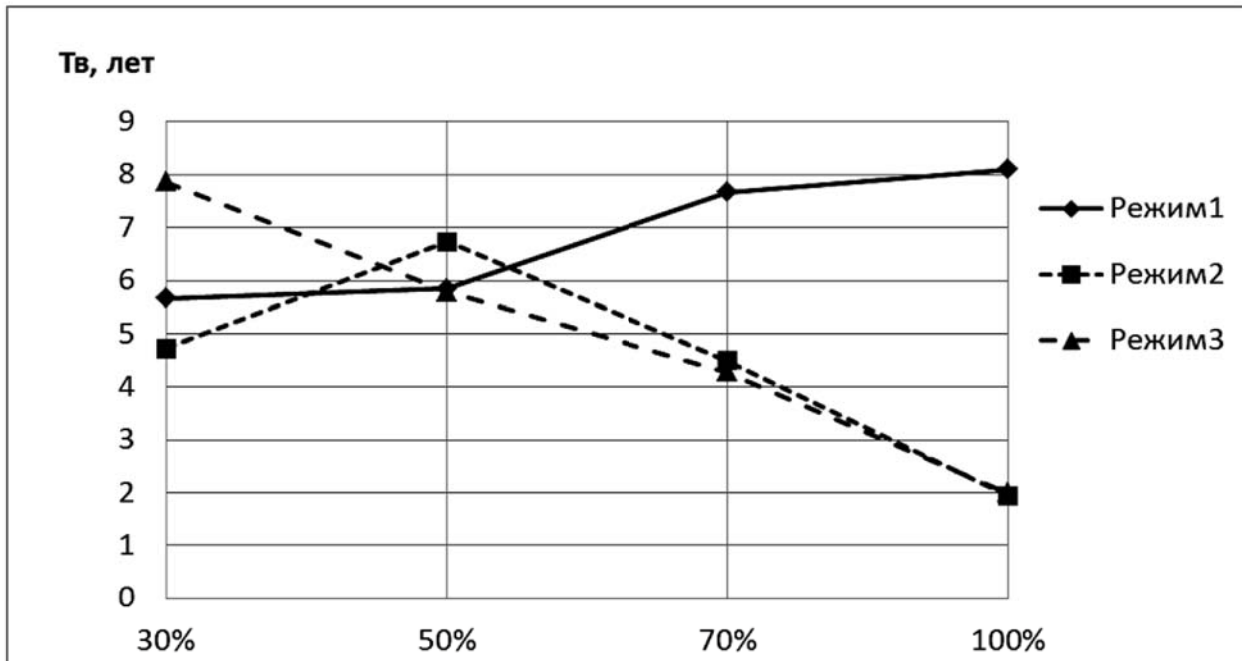


Рисунок 4. Зависимость срока возврата капиталовложений T_v от степени загрузки трансформатора для различных режимов при замене трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n на $Y/2Z_n$

Заключение

Результаты проведенных расчетов показывают экономическую эффективность применения в сельских электрических сетях силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для снижения уровней несимметрии и несинусоидальности питающих напряжений. Это подтверждается тем, что годовой

доход от замены трансформатора составит 84,01 руб. ...448 руб. Чистый дисконтированный доход – 16,23 руб. ...3986,6 руб. Срок возврата дополнительных капвложений – 1,94...8,1 года. Срок службы изоляционных материалов трансформатора увеличивается на 7 %...55 %, дополнительные потери активной мощности, вызванные искажением симметрии и синусоидальности питающих напряжений, уменьшаются на 1,93 %...3,33 %.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ**

1. Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2004. – 216 с.
2. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко. – 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
3. Непомнящий, В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей / В.А. Непомнящий. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 188 с.
4. Шваб, А. Электромагнитная совместимость: пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора; под ред. Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 480 с.: ил.
5. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: пер с нем. / И.П. Кужекин; под ред. Б.К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.: ил.
6. Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон. – Москва: «Додо-XXI», 2008. – 333 с.
7. Жежеленко, И.В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях / И.В. Жежеленко, М.А. Короткевич – Мн.: Вышэйшая школа, 2012. – 197 с.
8. Прищепов, М.А. Перспективный силовой трансформатор с улучшенными характеристиками для сельских электрических сетей / М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59. № 3. – С. 355-366.
9. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
10. Прищепов, М.А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16-25.
11. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25-31.
12. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейном характере нагрузки / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 1. – С. 9-19.
13. Прищепов, М.А. Использование силовых трансформаторов с улучшенными характеристиками в сельских электросетях, питающих несимметричные и нелинейные нагрузки / М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга // Энергетическая стратегия. – 2021. – № 4 (82) – С. 50-53.
14. Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев: Навукова думка, 1985. – 267 с.
15. Прищепов, М.А. Технично-экономическая оптимизация конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» / М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга // Агропанорама. – 2021. – № 2. – С. 24-29.
16. Зеленкевич, А.И. Работа трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда-зигзаг» при однофазной несимметричной нагрузке / А.И. Зеленкевич // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы VII Междунар. науч.-практич. конф., РФ, Саратов / ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов, 2020. С. 23-26.
17. Зеленкевич, А.И. Результаты исследований работы трансформаторов с различными схемами соединения обмоток при однофазной несимметричной нагрузке / А.И. Зеленкевич // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы 8-й Междунар. науч.-практич. конф., Саратов, 21-22 апреля 2021 г./ ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ; редкол.: А.В. Русинов [и др.]. – Саратов: Амирит, 2021. – С. 4-8.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.01.2022