

межутке составило 1.16 м/с^2 , что также укладывается в нормативные пределы.

Таким образом, несмотря на сильные пульсации момента двигателей скорость движения вагона изменяется плавно, а ускорение находится в допустимых пределах. Если же наполненность вагона далека от максимальной, то темп разгона увеличится, так как уменьшится нагрузка на тяговые двигатели.

Для анализа режимов работы электроснабжения метрополитена разработана компьютерная модель как самой подстанции электроснабжения метрополитена, так и подсистемы вагона. Это позволяет наглядно познакомиться с режимами работы подвижного состава метрополитена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев В. В., Захаров А. Е. Моделирование совмещенной тягово-понижительной подстанции метрополитена // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 6. С. 114–119.

2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.

V. V. Korolev, A. E. Zaharov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SIMULATION OF POWER SUPPLY FOR THE MOBILE COMPOSITION OF THE SUBWAY

The article is devoted to the simulation of power supply of the mobile composition of the subway. The paper presents the power supply scheme of the metro area, on the basis of which the model was developed in the SIMULINK package of the MATLAB program. As a load for converting devices of traction current, a submodel of the rolling stock car is used, which takes into account not only the parameters of the car, but also allows to simulate its control system and modes of operation. To study the transients in the model of the railway carriage, different states of control circuits of traction motors are simulated. The parameters of the traction motors in the model are calculated based on the load capacity of the car. Presented obtained as a result of modeling the dependence of the frequency of rotation, current and moment of the traction motor, as well as the speed and load characteristics of the car. Analyzed the simulation results and made recommendations for improving the power supply of rolling stock of the metro.

Subway, transformer, substation, railway carriage, traction electric motor

УДК 621.313

А. Г. Лавров, Е. Н. Попов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Анализ технико-экономических показателей трансформатора при регулировании его напряжения с переменным по величине магнитным потоком

Проводится анализ технико-экономических показателей двухобмоточного понижающего трансформатора, характеризующих его работу после окончания процесса регулирования вторичного напряжения с переменным по величине магнитным потоком в диапазоне 5–15 %. Рассмотрены режимы регулирования вторичного напряжения трансформатора при размещении регулировочной обмотки на стороне высшего напряжения. Проведена количественная оценка влияния режима регулирования при переменном магнитном потоке на основные показатели трансформатора. Выявлены параметры трансформатора, на которые переменный магнитный поток оказывает наибольшее и наименьшее действие. Описаны возможные негативные последствия длительной работы трансформатора в режиме регулирования вторичного напряжения при переменном магнитном потоке. Показана необходимость учета влияния переменного по значению магнитного потока на параметры трансформатора на стадии проектирования и изготовления.

Двухобмоточный трансформатор, регулирование напряжения, переменный магнитный поток, режимы регулирования, технико-экономические показатели, параметры трансформатора

В настоящее время одной из важнейших проблем в электроэнергетике, обеспечивающей электроэнергией промышленные предприятия, установ-

ки и комплексы, является обеспечение стабильности напряжения в системе электроснабжения.

Для поддержания требуемых технико-экономических показателей режимов работы электрических сетей и обеспечения стабильности технологических процессов, а значит, и качества выпускаемой продукции, необходимо регулировать напряжение.

Регулирование напряжения на шинах потребителей преимущественно осуществляется с помощью устройств, изменяющих коэффициенты трансформации трансформаторов под нагрузкой.

В [1]–[5] указывается, что регулировочные ответвления целесообразно выполнять на той обмотке трансформатора, напряжение на которой в процессе эксплуатации подвергается изменениям. Несмотря на это в трансформаторах, выпускаемых отечественной промышленностью, регулировочная обмотка устанавливается исключительно на стороне высшего напряжения трансформатора, независимо от того, напряжение какой обмотки будет изменяться в рабочем режиме.

В [6] указано, что регулирование вторичного напряжения понижающего трансформатора с по-

мощью регулировочных ответвлений, выполненных на первичной обмотке, может осуществляться либо с постоянным, либо с переменным по значению магнитным потоком. Если причиной отклонения вторичного напряжения служит изменение напряжения питающей сети, то регулирование осуществляется при постоянном магнитном потоке. По окончании процесса регулирования трансформатор продолжает работу с номинальными электромагнитными параметрами.

Если вторичное напряжение изменяется под действием нагрузки, то регулирование осуществляется при переменном магнитном потоке. После завершения процесса регулирования трансформатор начинает работать с параметрами, отличными от номинальных. Это отрицательно отражается на его технико-экономических показателях, а в ряде случаев может привести к тяжелым или даже аварийным условиям [6].

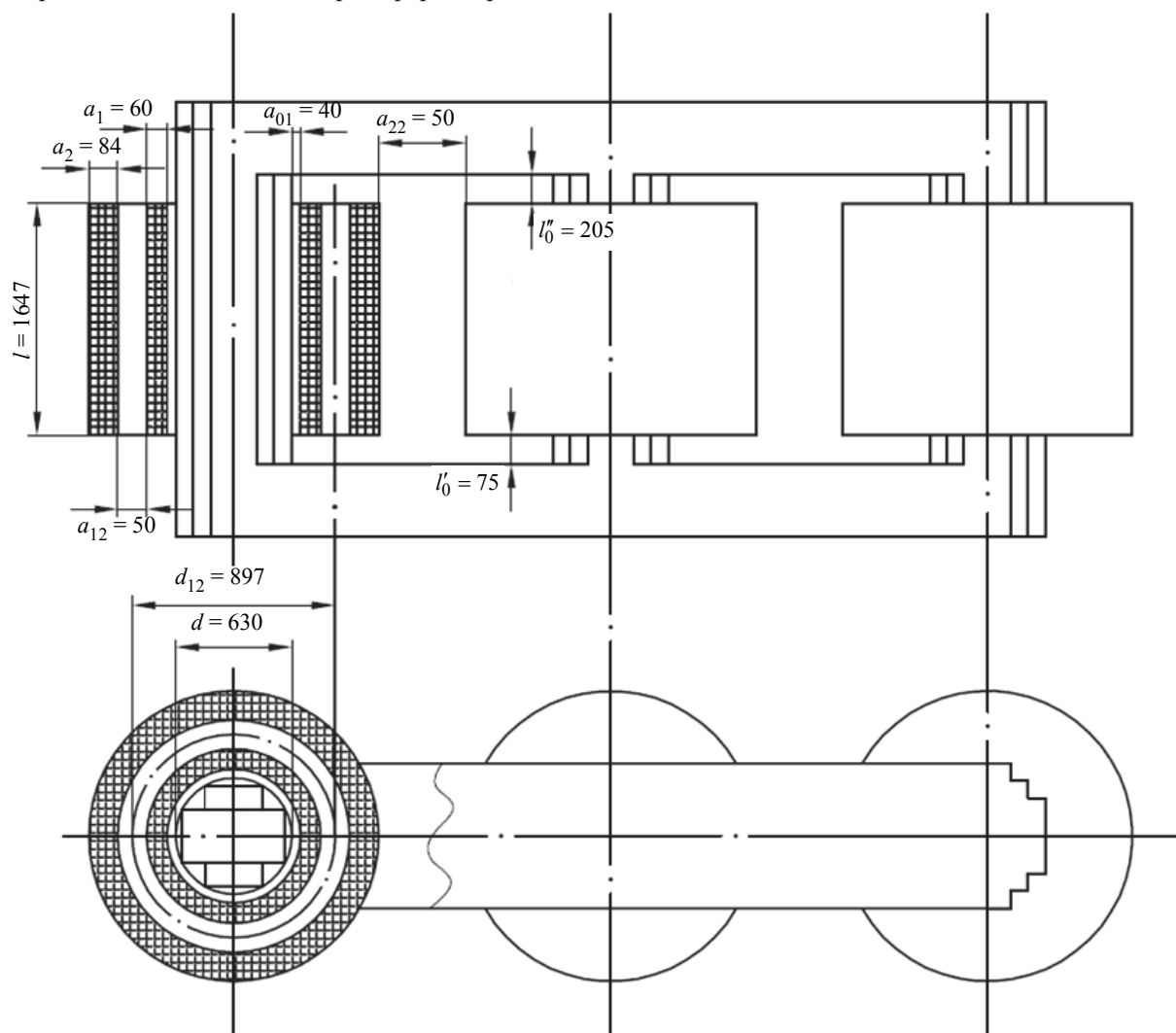


Рис. 1

О существовании данной проблемы написано в [7]: «Многолетний опыт показывает, что серьезные неполадки или серии аварий из-за недостатков электромагнитного расчета были связаны не с количественной ошибкой или неточностью расчета, а с тем, что явление, оказавшееся важным, вообще не учитывалось при проектировании».

Несмотря на это в настоящее время в научно-технической литературе отсутствуют работы, посвященные данному вопросу, и указанный факт не учитывается при проектировании трансформаторов.

Исходя из сказанного, целью данной статьи является количественный анализ основных параметров трансформатора, характеризующих его работу после окончания процесса регулирования вторичного напряжения, с переменным по значению магнитным потоком.

Для достижения указанной цели выбран силовой двухобмоточный трансформатор ТДН 40 000/110. Результаты, полученные при анализе его основных параметров, можно распространить на большинство трансформаторов, выпускаемых отечественной промышленностью, поскольку они обладают свойством электромагнитного подобия.

Параметры трансформатора ТДН 40 000/110, а также нормированные значения потерь, напряжения короткого замыкания и тока холостого хода определяются ГОСТ 12965–85 [8] и сведены в табл. 1, 2. Основные размеры трансформатора ТДН 40 000/110 представлены на рис. 1.

На рис. 1: a_{12} – расстояние между обмотками высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН); a_{01} – изоляционное расстояние обмотки НН от стержня; l'_0, l''_0 – расстояние до обмотки ВН от нижнего и верхнего ярма; d_{12} – средний диаметр обмотки; d – диаметр стержня; l – высота обмотки; a_1, a_2 – радиальные размеры обмоток НН, ВН; a_{22} – расстояние между обмотками.

Уменьшение результирующего магнитного потока при регулировании вторичного напряжения трансформатора приводит к недоиспользованию трансформатора без каких-либо неблагоприятных условий работы, поэтому в данной статье рассматривается только случай регулирования напряжения увеличением магнитного потока.

При выполнении анализа применялась методика [9], график зависимости индукции в стали от напряженности поля (рис. 2), график зависимости потерь в стали от индукции (рис. 3) и рассматривались параметры трансформатора при уменьшении числа витков первичной обмотки на 5, 10 и 15 %, что приводит к пропорциональному увеличению магнитного потока трансформатора.

В табл. 3 приведены результаты количественного анализа в виде абсолютных и относительных значений основных параметров трансформатора, где $w_{ВН}$ – число витков первичной (высшего напряжения) обмотки трансформатора.

Таблица 1

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВ · А	40 000
Количество фаз, шт	3
Частота, Гц	50
Высшее напряжение, кВ	115
Низшее напряжение, кВ	38.5
Схема и группа соединения обмоток	Ун/Д-11
Вид устройства регулирования под нагрузкой	В нейтрали ВН $\pm 16\%$; ± 9 ступеней
Охлаждение	Масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла (Д)
Тип установки	Внешняя
Материал обмоток	Медь
Класс нагревостойкости изоляции	А
Конструкция магнитной системы	Плоская магнитная система стержневого типа с концентрическими обмотками
Характер нагрузки	Длительная

Таблица 2

Тип трансформатора	Потери, кВт		Напряжение короткого замыкания для обмоток ВН–НН, %	Ток холостого хода, %
	холостого хода	короткого замыкания		
ТДН 40 000/110	34	170	10.5	0.55

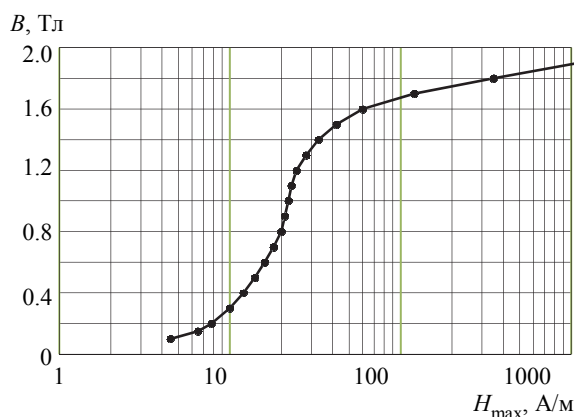


Рис. 2

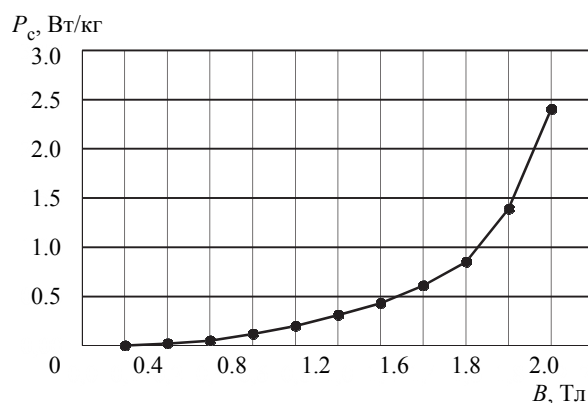


Рис. 3

Таблица 3

Параметр	$w_{ВН}$		0.95 $w_{ВН}$		0.9 $w_{ВН}$		0.85 $w_{ВН}$	
	абс. знач.	о. е.	абс. знач.	о. е.	абс. знач.	о. е.	абс. знач.	о. е.
Потери в обмотке ВН, кВт	79.2	1	83.2	1.05	87.2	1.1	91.1	1.15
Потери КЗ, кВт	167	1	171	1.02	175	1.05	179	1.072
Относительное значение напряжения КЗ, %	10.46	1	9.5	0.91	8.65	0.83	7.91	0.76
Ток КЗ в обмотке ВН, кА	1.86	1	2.1	1.13	2.25	1.21	2.45	1.32
Средняя удельная радиальная сила в обмотке ВН, кН	5.8	1	6.9	1.19	8.3	1.43	9.8	1.69
Средняя удельная радиальная сила в обмотке НН, кН	10	1	12.1	1.21	14.3	1.43	16.8	1.68
Среднее растягивающее напряжение в обмотке ВН, МПа	43.5	1	52	1.2	62	1.43	73	1.68
Среднее сжимающее напряжение в обмотке НН, МПа	31.5	1	38	1.2	45	1.43	53	1.68
Относительное значение тока ХХ, %	0.467	1	0.763	1.6	1.73	3.7	3.26	6.98
Потери ХХ, кВт	34.9	1	40.4	1.16	50.5	1.45	61.6	1.77
Суммарные потери, кВт	201.9	1	211.4	1.05	225.5	1.12	240.6	1.19
КПД, %	99.5	1	99.47	0.99	99.44	0.99	99.4	0.99
Превышение температуры обмотки ВН над воздухом, °С	56.5	1	57.3	1.01	59.3	1.05	61.4	1.087
Превышение температуры обмотки НН над воздухом, °С	62.1	1	62.9	1.01	64.9	1.04	67	1.079

Изменение числа витков первичной обмотки заключается в подключении с помощью устройства РПН витков регулировочной обмотки, включенных согласно или встречно относительно обмотки ВН. Подключение дополнительных витков к первичной обмотке влечет за собой изменение падения напряжения на полном сопротивлении обмотки ВН вследствие увеличения активного сопротивления и увеличения (в случае согласного включения) или уменьшения (в случае встречного включения) индуктивного сопротивления.

Как видно из табл. 3, основные потери в обмотке ВН трансформатора увеличиваются пропорционально увеличению результирующего магнитного потока, что влечет за собой увеличение общих потерь короткого замыкания на 2–7 % соответственно.

При расчете потерь короткого замыкания не учитывалось изменение добавочных потерь в обмотках и отводах от вихревых токов, замыкаю-

щихся в отдельных проводах, и циркулирующих токов, замыкающихся в параллельных ветвях обмоток, поскольку добавочные потери, как правило, составляют 1–2 % от общих потерь короткого замыкания и их изменения в рассматриваемом случае пренебрежимо малы.

Уменьшение числа витков первичной обмотки на 5, 10 и 15 % ведет к изменению сопротивления КЗ, в связи с чем уменьшается напряжение короткого замыкания на 9, 17 и 24 % и увеличивается ток короткого замыкания на 13, 21 и 32 % соответственно, что уменьшает общую стойкость трансформатора при КЗ.

Увеличение тока короткого замыкания (КЗ) в 1.1...1.3 раза приводит к увеличению удельной радиальной силы в обмотках ВН и НН трансформатора в 1.2...1.7 раз, что, соответственно, приводит к пропорциональному увеличению средних растягивающего и сжимающего напряжений в проводах обмоток.

Радиальные силы, возникающие из-за осевой составляющей магнитного поля рассеяния, вызывают растяжение наружных обмоток и сжатие внутренних [10].

Согласно расчетам, уже при увеличении магнитного потока на 10 % среднее растягивающее напряжение в проводниках обмотки ВН превышает допустимое 60 МПа [9].

Радиальные силы оказывают различное воздействие на наружную и внутреннюю обмотки. Они наиболее опасны для проводов внутренней обмотки, испытывающих сжатие и изгибающихся под действием радиальных сил в пролетах между рейками, на которые намотана обмотка. Нарушение равновесия обмотки и ее разрушение возможны вследствие как изгиба провода в пролетах между рейками, так и потери устойчивости. Значительное увеличение радиальной силы может привести к разрушению обмотки, к деформации или разрыву витков либо к разрушению опорных конструкций [10].

При увеличении магнитного потока трансформатора на 15 % ток холостого хода увеличивается в 7 раз, а потери холостого хода в 1.7 раз.

Однако указанные увеличения тока и потерь холостого хода фактически не оказывают заметного влияния на КПД трансформатора, так как ток холостого хода составляет менее одного процента от номинального, а потери холостого хода практически в 6 раз меньше потерь короткого замыкания.

Увеличение суммарных потерь в трансформаторе приводит к увеличению температуры обмо-

ток на 5 °С, а согласно ГОСТ 14209–97 [11] скорость термического износа изоляции удваивается при каждом изменении температуры на 6 °С. Следовательно, регулирование напряжения в пределах 15 % уменьшает срок службы изоляции, а соответственно, и самого трансформатора приблизительно в два раза.

Количественный анализ основных параметров трансформатора, характеризующих его работу после окончания процесса регулирования вторичного напряжения с переменным по значению магнитным потоком в диапазоне 5–15 %, показал, что:

- несмотря на увеличение суммарных потерь на 20 %, КПД трансформатора уменьшается незначительно – на 0.1 %;

- возникают значительные радиальные силы в обмотках, которые могут привести к разрушению трансформатора, что необходимо учитывать при проектировании и изготовлении трансформаторов;

- увеличение суммарных потерь, вызванное изменением магнитного потока, приводит к значительному повышению температуры обмоток и масла трансформатора, вследствие чего срок его службы уменьшается практически в два раза;

- наибольшее негативное влияние регулирование напряжения с переменным магнитным потоком оказывает на понижающие распределительные трансформаторы, у которых повышенные относительные значения тока и потерь XX. Значительное увеличение потерь в стали может привести к перегреву и разрушению изоляции их листов, на что необходимо обращать особое внимание при проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Г. Н. Электрические машины: в 3 ч. Ч. 1. Введение. Трансформаторы: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1974. 240 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: учеб. для вузов: в 2 т. Т. 1. 3-е изд., стер. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 652 с.
3. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
4. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. 4-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2014. 648 с.
5. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1990. 528 с.
6. Лавров А. Г., Попов Е. Н. Анализ режимов регулирования вторичного напряжения трансформато-

ров с устройствами РПН // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 5. С. 53–58.

7. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 392 с.

8. ГОСТ 12965–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1985.

9. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. учеб. пособие для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1986. 544 с.

10. Лурье А. И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. М.: Знак, 2005. 520 с.

11. ГОСТ 14209–97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. М.: Межгоссовет по станд., метр. и сертиф., 1997.

A. G. Lavrov, E. N. Popov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ANALYSIS OF TECHNICAL-ECONOMIC INDICATORS OF TRANSFORMER WHEN REGULATING VOLTAGE WITH VARIABLE BY VALUE MAGNETIC FLUX

The technical and economic characteristics of a two-winding step-down transformer are analyzed, which characterize its operation after the end of the secondary voltage regulation process with a variable magnetic flux in the range of 5-15%. Regimes for regulating the secondary voltage of the transformer are considered when placing the adjusting winding on the high voltage side. A quantitative assessment of the effect of the control regime under variable magnetic flux on the main characteristics of the transformer is made. The parameters of the transformer are revealed, to which the alternating magnetic flux has the greatest and smallest effect. Possible negative consequences of the long-term operation of the transformer in the regulating mode of the secondary voltage with variable magnetic flux are described. It is shown that it is necessary to take into account the effect of a variable magnetic flux on the parameters of the transformer at the design and fabrication stage.

Two-winding transformer, voltage regulation, alternating magnetic flux, regulating modes, technical and economic indicators, transformer parameters
