



Вольтодобавочный трансформатор в условиях меняющейся тяговой нагрузки



Станислав ВЛАСОВ

Stanislav P. VLASOV

На основе принципов математической статистики и теории вероятностей излагается методика определения суточного коэффициента полезного действия трансформатора, работающего в условиях непрерывно изменяющейся тяговой нагрузки. Полученные при этом результаты применимы для выявления реально существующих потерь электрической энергии в трансформаторном оборудовании, а также для мероприятий по энергосбережению, в частности при оценке целесообразности параллельной работы трансформаторов на общую нагрузку.

Ключевые слова: железная дорога, вольтодобавочный трансформатор, коэффициент полезного действия, тяговая нагрузка, метод оптимума номинала.

Власов Станислав Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Система тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока 25 кВ при питании сети от трехфазных трансформаторов с соединением высоковольтной и тяговой обмоток по схеме звезда-треугольник при многих положительных качествах обладает и рядом специфических особенностей. Любая из них может стать причиной снижения технико-экономической эффективности этой системы [1].

Одной из таких особенностей является неравенство напряжений на рабочих фазах подстанции при одинаковых токовых нагрузках плеч питания. Это объясняется несимметричным режимом работы симметричного трехфазного тягового трансформатора на тяговую нагрузку двух плеч питания. Напряжение на так называемой отстающей фазе тяговой подстанции при прочих равных условиях оказывается ниже напряжения на другой — опережающей фазе подстанции.

Для повышения эффективности системы тягового электроснабжения предложено применять однофазные двухобмоточные вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ) с включением вольтодобавочной обмотки в отстающую фазу тяговой подстанции [2,3].

С помощью ВДТ может осуществляться ступенчатое продольно-поперечное регулирование напряжения на отстающей фазе тяговой подстанции, благодаря чему в тяговой сети значительно уменьшается «перекос» напряжений на концах межподстанционной зоны по величине и по фазе, поддерживается рациональный уровень напряжения и достигается снижение потерь электрической энергии за счет уменьшения уравнительного тока [3,4,5].

На СВПО «Трансформатор» по заказу МПС в 1989 году было налажено производство унифицированных многофункциональных трансформаторов ОРМЖ-10000/27 для использования в установках регулируемой поперечной емкостной компенсации (предложение проф. Р.Р. Мамошина) и в качестве ВДТ (предложение кафедры ТОЭ МИИТ и Красноярской ж.д.). Один из головных образцов трансформатора ОРМЖ-10000/27 был установлен в отстающую фазу тяговой подстанции Тяжин Красноярской железной дороги и включен в эксплуатацию по схеме ВДТ в 1990 году [4].

Несмотря на свою относительную простоту, вольтодобавочный трансформатор выдвигает ряд достаточно сложных задач. Одной из таких является задача по определению потерь энергии в самом трансформаторе. Основным фактором, влияющим на экономичность его работы, служит динамика нагрузки. Тяговая нагрузка, взаимодействующая с ВДТ, претерпевает непрерывные изменения в широких пределах. В этих условиях, даже имея очень высокий коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора и относительно малые его колебания, представляется необходимым определение интегрального КПД за длительный промежуток времени.

М.О. Доливо-Добровольский утверждал, что следует определять КПД трансформатора зависимым от графика дневного потребления тока, с неблагоприятным характером которого конструктор трансформатора ничего не может сделать.

Из сказанного следует, что КПД любого трансформатора должен определяться как совокупность всех значений КПД в течение рассматриваемого промежутка времени. КПД трансформатора, определенный указанным выше способом с учетом измене-

ния нагрузки, будет отличен от КПД при неизменной полной нагрузке $\eta_{ном}$ и от КПД при неизменной оптимальной нагрузке η_{max} . Известно, что η_{max} может быть получен в условиях неизменной жестко заданной (детерминированной) нагрузки, когда потери в стали равны потерям в меди [6], то есть при

$$\beta = \beta_{opt} = \frac{I_{opt}}{I_{ном}} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}}.$$

При тяговой нагрузке, носящей случайный характер, для определения КПД ВДТ требуется применение иного подхода, основанного на принципах математической статистики и теории вероятностей. Теоретическое обоснование и корректное решение этой сложной задачи, поставленной еще М.О. Доливо-Добровольским и М. Видмаром, стало возможным после разработки методов вероятностной оптимизации, в частности метода оптимума номинала [7]

Используем метод оптимума номинала к определению КПД вольтодобавочного трансформатора, работающего в условиях нагрузки, носящей случайный характер. Применим этот же метод для оптимизации его параметров.

При решении первой задачи, то есть нахождении КПД реально существующего трансформатора, следует определить суммы отдельных значений КПД при воздействии на этот трансформатор нагрузки, распределенной в заданном промежутке времени.

При решении второй задачи, то есть определении оптимальных параметров проектируемого трансформатора, необходимо найти такие его параметры (в данном

случае $\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}}$), чтобы при воздействии на этот трансформатор той же случайной нагрузки получить наибольшую сумму отдельных значений КПД в заданный промежуток времени. Таким промежутком времени в электроэнергетике является год. Иногда используются суточные графики тока рабочих и выходных дней каждого месяца. Представляется, что в рамках расчетного примера для тяговой нагрузки в качестве расчетного промежутка времени можно использовать одни сутки. В течение



Определение коэффициента полезного действия ВДТ типа ОРМЖ-10000/27 в условиях тяговой нагрузки подстанции Тяжин

№	Интервал $I_i \div I_i + \Delta I$	Интервал $\beta_i \div \beta_i + \Delta \beta$	Сере- дина интер- вала β_i	Часто- ты m_i	Частоты $f\beta_i$	Накопл.- частоты $\Sigma f\beta_i$	Плот- ность распре- деления $h\beta_i = \frac{\Sigma f\beta_i}{\Delta \beta}$	КПД $\eta(\beta_{\text{отн}} = 0,447;$ $\beta_i)$	$\eta_{\beta i} \cdot f_{\beta i}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0-100	0-0,05	0,025	8	0,0278	0,0278	0,566	0,9522420	0,0264723
2	101-200	0,05-0,10	0,075	46	0,1597	0,1875	3,194	0,9831542	0,1570097
3	201-300	0,10-0,15	0,125	62	0,2153	0,4028	4,306	0,9893343	0,2130036
4	301-400	0,15-0,20	0,175	70	0,2430	0,6458	4,860	0,9918308	0,2410149
5	401-500	0,20-0,25	0,225	40	0,1389	0,7847	2,778	0,9930867	0,1379397
6	501-600	0,25-0,30	0,275	32	0,1111	0,8958	2,222	0,9937750	0,1104084
7	601-700	0,30-0,35	0,325	16	0,0556	0,9514	1,112	0,9941572	0,0552751
8	701-800	0,35-0,40	0,375	7	0,0243	0,9757	0,486	0,9943552	0,0241628
9	801-900	0,40-0,45	0,425	2	0,0069	0,9826	0,238	0,9944339	0,006815
10	901-1000	0,45-0,50	0,475	3	0,0105	0,9931	0,210	0,9944310	0,0104415
11	1001-1100	0,50-0,55	0,525	2	0,0069	1,0000	0,138	0,9943698	0,0068611
			0,600	N=288				0,9942006	$\eta = \Sigma \eta_{\beta i} \cdot f_{\beta i} =$ 09894506
			0,800					0,9934798	
			1,000					0,9925559	
			1,200					0,9915307	

суток тяговая нагрузка изменяется в широких пределах. В последующем процесс практически повторяется в соответствии с графиком движения поездов.

В соответствии с методом оптимума номинала КПД трансформатора следует определять по формуле:

$$\eta = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \eta(\beta_0, \beta, t) \times f(\beta, t) d\beta dt;$$

где $\eta(\beta_0, \beta, t)$ – КПД трансформатора в зависимости от оптимальной нагрузки β_0 , относительной текущей нагрузки β и длительности ее существования t ;

$f(\beta, t)$ – распределение плотностей вероятностей относительной нагрузки β в течение анализируемого промежутка времени T ;

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{P_x}{P_k I}};$$

$$\beta_{\text{опт}} = \frac{I}{I_{\text{ном}}};$$

P_x – мощность потерь в стали ВДТ;

P_k – мощность потерь в меди ВДТ;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток трансформатора;

I – текущее значение тока нагрузки;

$\beta_{\max}$ и $\beta_{\min}$ – наименьшее и наибольшее относительные значения тока нагрузки за

время определения КПД трансформатора;

$0 - T$ – расчетный промежуток времени, за который определяется КПД трансформатора.

Если, например, в результате статистической обработки данных измерений известно распределение плотности вероятностей нагрузки $f(\beta)$ в течение анализируемого периода, то математически значение КПД за указанный период можно записать в виде [7]:

$$\eta = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \eta(\beta) \times f(\beta) d\beta.$$

Применение метода оптимума номинала необязательно связано с необходимостью определения законов распределения плотности вероятностей нагрузки $f(\beta)$, $f_{\beta i}$ может представлять и частоту любого статистического ряда распределения:

$$f_{\beta i} = \frac{m_i}{N};$$

где m_i – частота появления определенного признака в рассматриваемом интервале;

N – общее количество наблюдений.

В этом случае [8]:

$$\eta = \sum_{i=1}^k \eta_{\beta i} * f_{\beta i} * \Delta \beta = \sum_{i=1}^k \eta_{\beta i} * P_{\beta i}; \quad (1)$$

Таблица 2

Результаты расчета целевой функции

$\beta_{\text{опт}}$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,447
$\varphi(\beta_{\text{опт}})$	0,9888694	0,9928	0,9931	0,9920	0,9900	0,9894

$\beta_{\text{опт}}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\varphi(\beta_{\text{опт}})$	0,9883	0,9866	0,9844	0,9827	0,9806	0,9788

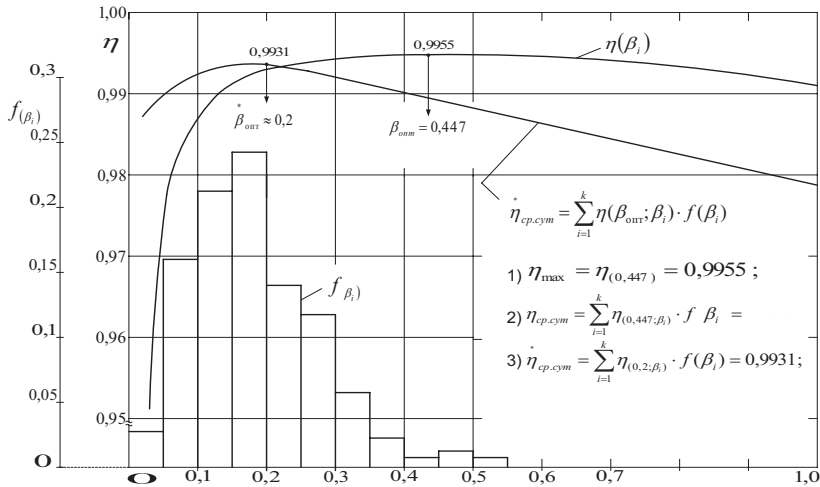


Рис. 1. К определению КПД ВДТ типа ОРМЖ-10000/27 с учетом случайного характера тяговой нагрузки отстающей фазы подстанции Тяжин.

где k – количество интервалов.
Применим формулу (1) для определения КПД ВДТ типа ОРМЖ-10000/27, установленного в отстающей фазе тяговой подстанции Тяжин Красноярской железной дороги.

На данной подстанции были выполнены измерения тока отстающего плеча питания, в расщелку которого включена вольтодобавочная обмотка ВДТ. Измерения проводились в течение суток с интервалами 5 мин.

Наименьшее и наибольшее значения тока вторичной обмотки ВДТ оказались соответственно 30 и 1090 А. Определим относительные значения наименьшей и наибольшей нагрузок:

$$\beta_{\min} = \frac{I_{\min}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{30}{2000} = 0,015;$$
$$\beta_{\max} = \frac{I_{\max}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{1090}{2000} = 0,545;$$

Здесь $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток вольтодобавочной обмотки ВДТ [3].

В соответствии с рекомендациями [8] принимаем ширину интервала изменения тяговой нагрузки:

$$\Delta\beta = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{k} = \frac{0,545 - 0,015}{11} \approx 0,05;$$

где $k=11$ – рекомендуемое количество интервалов.

Определяем середину каждого интервала.

Распределяя выявленные величины тока тяговой нагрузки по интервалам, находим частоты m_i , частости и $f_{\beta i} = \frac{m_i}{N}$, плотности распределения $h_{\beta i} = \frac{f_{\beta i}}{\Delta\beta}$

Результаты определения этих величин заносим в таблицу 1. На рис. 1 представлена гистограмма распределения плотности вероятности тяговой нагрузки

$$f_{\beta i} = h_{\beta i} \Delta\beta = \frac{m_i}{N}.$$

Для расчета кривой КПД трансформатора в зависимости от относительной нагрузки $\eta(\beta)$ рекомендуется формула [8]:





$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_x + P_x}{\beta S_n \cos \phi_2 + \beta^2 P_k + P_x}; \quad (2)$$

в которой: S_n — номинальная мощность трансформатора; в рассматриваемом случае $S_n = 1000$; $\cos \phi_2$ — коэффициент мощности нагрузки, применительно к тяговой нагрузке фидерной зоны Тяжин — Каштан принимаем $\cos \phi_2 = 0,8$. После некоторых преобразований формула (2) может быть представлена в более удобном для расчетов виде [8]:

$$\eta = \frac{1}{1 + m \left(\frac{\beta_{\text{опт}}}{2\beta} + \frac{\beta}{2\beta_{\text{опт}}} \right)}; \quad (3)$$

где $m = \frac{1}{\cos \phi_2} - 1$ — безразмерный коэффициент;

$$\eta_{\text{max}} = \frac{S_n \beta_{\text{опт}}}{S_n \beta_{\text{опт}} + 2P_x} - \text{максимальное}$$

значение КПД трансформатора, соответствующее оптимальной нагрузке.

Для рассматриваемого ВДТ типа ОРМЖ-10000/27 [3]:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3}} = 0,4472;$$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,4472}{10 \cdot 10^6 \cdot 0,4472 + 2 \cdot 10 \cdot 10^3};$$

$$= 0,9955476 \approx 0,99555$$

$$m = \frac{1}{0,99555} - 1 = 5,5872 \cdot 10^{-3}.$$

После подстановки в формулу (3) констант, соответствующих трансформатору ОРМЖ-10000/27, получим окончательное выражение для определения КПД ВДТ при любой относительной тяговой нагрузке β_i :

$$\eta_{\beta_i} = \frac{1}{1 + 5,5872 \cdot 10^{-3} \left(\frac{0,2236}{\beta_i} + \frac{\beta_i}{0,8944} \right)}. \quad (3')$$

Результаты расчетов η_{β_i} ВДТ по формуле (3') при $\beta_{\text{опт}} = 0,447$ приведены в таблице 1. Кривая η_{β_i} приведена также на рисунке.

Рассчитываем среднесуточное значение КПД ВДТ по формуле (1). Получаем $\eta = 0,9894$, что несколько хуже, чем $\eta_{\text{max}} = 0,9855$. Это объясняется тем обстоятельством, что тяговая нагрузка отстающего плеча питания подстанции Тяжин распределяется в основном при значениях $\beta < \beta_{\text{опт}}$. Анализ гистограммы распределения тяговой нагрузки (см. рис. 1) показывает, что наибольший КПД имел бы трансформатор при $\beta_{\text{опт}} = 0,15 \div 0,25$. Применительно к трансформатору ОРМЖ-10000/27 можно сделать вывод о том, что его КПД будет повышаться при увеличении тяговых нагрузок, то есть β .

Вторая из поставленных задач — оптимизации параметров ВДТ применительно к случайному характеру тяговой нагрузки — решается путем максимизации математического ожидания КПД за рассматриваемый промежуток времени. При этом целевая функция (функционал) может быть записана в соответствии с методом оптимума номинала в следующем виде:

$$\phi(\beta_{\text{опт}}) = \eta(\beta_{\text{опт}}) =$$

$$\int_{\beta_{\text{опт}}^{\text{min}}}^{\beta_{\text{max}}} \eta(\beta_{\text{опт}}, \beta, t) f(\beta, t) d\beta dt$$

где $\beta_{\text{опт}}^{\text{min}}$ — искомая точка, характеризующая отношение потерь в стали и меди трансформатора и определяющая его габаритные размеры.

Переходя к дискретному методу оптимума номинала, получим:

$$\phi(\beta_{\text{опт}}) = \eta(\beta_{\text{опт}}) = \Delta\beta \sum_{i=1}^k \eta(\beta_{\text{опт}}, \beta_i) * h(\beta_i) = \sum_{i=1}^k \eta(\beta_{\text{опт}}, \beta_i) * h(\beta_i). \quad (4)$$

Используя последнее выражение, необходимо подобрать такое значение $\beta_{\text{опт}}$ при котором целевая функция, то есть КПД трансформатора за рассматриваемый промежуток времени, в условиях случайного характера нагрузки примет наибольшее значение: $\phi = \eta(\beta_{\text{опт}}) = \text{max}$.

В расчетной формуле (4) функция $f(\beta_i)$ характеризуется гистограммой распределения плотности вероятности тяговой нагрузки, представленной в таблице 1 и на рис. 1 кривой $f(\beta_i)$.

Расчет функций $\eta(\beta_{опт}, \beta_i)$ при разных фиксированных значениях β_i осуществляется по формуле (1). Итоговые результаты расчета целевой функции $\phi(\beta_{опт}) = \eta(\beta_{опт}, \beta_i)$ приведены в таблице 2.

График целевой функции $\eta'_{ср.сут} = \eta(\beta_{опт}, \beta_i)$ также представлен на рис. 1. Максимум ее имеет место при $\beta'_{опт} \cong 0,2$, что хорошо согласуется с гистограммой распределения тяговой нагрузки отстающего плеча питания подстанции Тяжин, где был установлен ВДТ.

Это означает, что в условиях рассматриваемой в примере тяговой нагрузки, имеющей случайный характер, наибольшим КПД за учитываемый промежуток времени обладал бы вольтодобавочный трансформатор с соотношением потерь в стали и меди:

$$\beta'_{опт} = \sqrt{\frac{P'_k}{P'_x}} \cong 0,2.$$

Определим потери в стали при новом значении $\beta_{опт} = \beta'_{опт} = 0,2$:

$$P'_x = \frac{S_H \beta'_{опт} \left(\frac{1}{\eta_{\max}} - 1 \right)}{2} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \left(\frac{1}{0,99555} - 1 \right)}{2} \cong 4,47 \text{ кВт}$$

Потери в меди соответственно должны быть равны:

$$P'_k = \frac{P'_x}{\beta'^2_{опт}} = \frac{4,47}{0,2^2} = 111,75 \text{ кВт}.$$

ВЫВОДЫ

На примере ВДТ приведена методика определения суточного КПД трансформатора, работающего в условиях непрерывно изменяющейся нагрузки. Эту методику можно использовать для определения КПД любого трансформатора за теоретически любой промежуток времени.

Полученные при этом результаты применимы для выявления реально существующих потерь электрической энергии в трансформаторном оборудовании, а также для мероприятий по энергосбережению, в частности при определении целесообразности и эффективности параллельной работы трансформаторов на общую нагрузку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог. — М. Транспорт, 1982.
2. Караев Р.И., Власов С.П., Заволока О.Г., Фролов А.В., Мамсуров В.А., Волчков Э.П., Болдырев В.И., Цыбанков В.А. Авторское свидетельство 1299852 СССР, МКИ В 60м 3/02. Устройство для электроснабжения тяговых сетей переменного тока. Заявлено 30.10.1985, опубликовано 30.03.1987, Бюл. № 12.
3. Власов С.П. Многофункциональный вольтодобавочный трансформатор //Транспорт: наука, техника, управление. — 1994. — № 5.
4. Власов С.П., Фролов А.В., Асанов Т.К. Эксплуатационные испытания вольтодобавочного трансформатора типа ОРМЖ-10000/27//Транспорт: наука, техника, управление. — 1994. — № 5.
5. Власов С.П. О возможности применения вольтодобавочных трансформаторов для ограничения уравнильных токов в электротяговых сетях магистральных железных дорог переменного тока //Транспорт: наука, техника, управление. — 2005. — № 11.
6. Петров Г.Н. Электрические машины. Часть I: Введение. Трансформаторы. — М.: Энергия, 1974.
7. Свечарник Д.В. Задача об оптимальности номинала при вероятностных расчетах //Труды Института машиностроения АН СССР. — М., 1957. — Вып.10.
8. Свечарник Д.В., Нарешелашвили Д.Г. Расчет на ЭЦВМ электрических параметров силовых трансформаторов при вероятностной оценке характеристик нагрузок. — М.: МИИТ, 1982. ●

BOOSTER TRANSFORMER UNDER THE CONDITIONS OF CHANGING TRACTION LOAD

Vlasov, Stanislav P. – D.Sc. (Tech), professor of the department of theory of electric engineering of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The author uses concepts of mathematical statistics and probability theory to formulate technique to define twenty-four-hour efficiency coefficient of a transformer working under permanently changing traction load.

The results of the study can be useful for detecting real power losses in transformer devices, for power saving and to assess necessity and efficiency of parallel operation of several transformers for common load.

Key words: railway, booster transformer, efficiency coefficient, traction load, optimum nominal method.

Координаты автора (contact information): Власов С. П. – (495) 6842462

