

Практическая и учебно-методическая роли векторных диаграмм силовых трансформаторов

А. Г. Лавров, В. А. Васильев✉

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

✉ vva09001@gmail.com

Аннотация. Проведен анализ научно-технической и учебно-методической литературы, посвященной методам построения и использования векторных диаграмм силовых трансформаторов. Вопрос об их применимости в практических расчетах остается открытым. Вызывает сомнение логичность, однозначность и корректность применяемого метода их построения. Показано, что векторные диаграммы силовых трансформаторов невозможно использовать при практических расчетах, так как они не позволяют определять значения величин, характеризующих работу трансформатора, поскольку невозможно с необходимой для расчетов точностью изобразить все векторы на одной диаграмме. Применяемый порядок построения диаграмм приводит к ошибочному пониманию причинно-следственных связей между физическими процессами в трансформаторе, противоречит принятым физическим представлениям и правилам электротехники. Сформулированы требования, которым должны отвечать векторные диаграммы для их эффективного применения в учебно-методических целях. Перечисленные требования достигаются применением предлагаемого нового подхода к построению векторных диаграмм.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, векторные диаграммы, порядок построения векторных диаграмм, падения напряжений, магнитные потоки

Для цитирования: Лавров А. Г., Васильев В. А. Практическая и учебно-методическая роли векторных диаграмм силовых трансформаторов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 2. С. 76–84. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-76-84.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Practical and Educational Role of Vector Diagrams of Power Transformers

A. G. Lavrov, V. A. Vasilev✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ vva09001@gmail.com

Abstract. The analysis of scientific, technical and educational literature devoted to the methods of construction and use of vector diagrams of power transformers is carried out. Questions about their applicability in practical calculations remain open. The logic, unambiguity and correctness of the applied method of their construction is questionable. It is shown that vector diagrams of power transformers cannot be used in practical calculations, since they do not allow determining the values of the quantities characterizing the operation of the transformer, since it is impossible to depict all vectors on one diagram with the accuracy necessary for calculations. The applied order of diagram construction leads to an erroneous understanding of cause-and-effect relationships between physical processes in a transformer, contradicts accepted physical concepts and rules of electrical engineering. The requirements that vector diagrams must meet for their effective use for educational and methodological purposes are formulated. These requirements are achieved by applying the proposed new approach to the construction of vector diagrams.

Keywords: power transformers, vector diagrams, the order of construction of vector diagrams, voltage drops, magnetic fluxes

For citation: Lavrov A. G., Vasilev V. A. Practical and Educational Role of Vector Diagrams of Power Transformers // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 76–84. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-76-84.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Силовые трансформаторы находят свое применение на всех стадиях передачи и распределения электрической энергии и являются одним из основных элементов современных электроэнергетических систем. Столь широкое использование трансформаторов, работающих в различных режимах и технических условиях, требует наличия адекватных и физически корректных методов анализа режимов их работы и расчета их параметров. Для указанных целей, наряду с классическим методом анализа с помощью дифференциальных уравнений, в настоящее время в практической и учебно-методической деятельности используют схемы замещения и векторные диаграммы силовых трансформаторов.

Анализ научной [1], [2] и учебно-методической [3]–[8] литературы, посвященной методу построения и использованию векторных диаграмм силовых трансформаторов, показал следующее:

- векторные диаграммы, будучи графической интерпретацией уравнений трансформатора, находят самое широкое использование в учебно-методической литературе, отмечается удобство их применения при объяснении принципа действия трансформаторов и анализа их режимов работы, причем логика и порядок их построения во всех источниках одинаковы;

- в [5], [7] указано на возможность с помощью векторных диаграмм, графически определять значения величин и параметров, характеризующих работу трансформаторов;

- в [4], [6] отмечено, что векторы падений напряжений в обмотках, тока холостого хода и его составляющих, представляющие собой малые величины по сравнению с векторами напряжений и токов обмоток, для построения наглядной векторной диаграммы произвольно увеличены;

- характерная для [1], [3]–[8] векторная диаграмма силового трансформатора, работающего на активно-индуктивную нагрузку, приведена на рис. 1, где \dot{U}_1 – напряжение первичной обмотки; $j\dot{I}_1x_1, \dot{I}_1r_1$ – падения напряжений в первичной обмотке на индуктивном и активном сопротивлениях соответственно; \dot{E}_1 – противоЭДС первичной обмотки; \dot{E}'_2 – приведенная ЭДС взаимной индукции

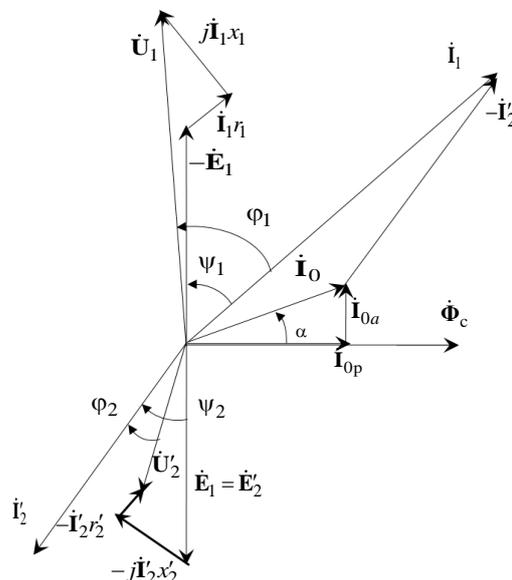


Рис. 1. Векторная диаграмма трансформатора
Fig. 1. Vector diagram of the transformer

вторичной обмотки; \dot{U}'_2 – приведенное напряжение вторичной обмотки; $\dot{I}_{0a}, \dot{I}_{0p}$ – активная и реактивная составляющие тока холостого хода; \dot{I}_1 – ток первичной обмотки; \dot{I}_2 – приведенный ток вторичной обмотки; $j\dot{I}_2x'_2, \dot{I}_2r'_2$ – падения напряжений в приведенной вторичной обмотке на приведенных индуктивном и активном сопротивлениях соответственно.

Кроме приведенных заключений проведенный анализ позволяет сформулировать ряд вопросов, которые остаются без ответа в учебно-методической литературе, – это вопросы о применимости векторных диаграмм силовых трансформаторов в практических расчетах, учебно-методических целях и о логичности, однозначности и корректности применяемого метода их построения.

Для ответа на вопрос о возможности применения векторных диаграмм для практических расчетов, графического нахождения параметров и величин трансформатора необходимо оценить соотношения модулей и фазовые сдвиги друг относительно друга векторов, используемых при построении.

Для этой цели выбраны силовые трансформаторы различных мощностей и напряжений, паспортные данные которых указаны в [9].

Табл. 1. Паспортные данные трансформатора ТМ-40/3
Tab. 1. Passport data of the ТМ-40/3 transformer

Полная мощность, S_H , кВА	Номинальное напряжение, кВ		Сопротивление короткого замыкания, Ом	
	высшее U_{1H}	низшее U_{2H}	активное r_k	индуктивное x_k
40	3	0.4	4.95	10.13

Табл. 2. Результаты расчета параметров силовых трансформаторов
Tab. 2. Results of calculation of parameters of power transformers

Паспортные данные Тип	Расчетные данные S_H , кВА	Номинальные напряжения, кВ ВН/НН, U_{1H}/U_{2H}	Сопротивления КЗ, Ом r_k/x_k	$I_1 r_1$, %	$I_1 x_1$, %	φ_1, \dots	ψ_2, \dots	$I_{x,x}$, % (I_{1H})
				(U_{1H})	(U_{1H})			
ТМ-40/3	40	3/0.4	4.95/10.13	0.63	1.30	26.8	26.3	4.50
ТМ-250/3	250	3/0.4	0.53/1.62	0.43	1.30	27.0	26.4	2.30
ТМ-630/3	630	3/0.4	0.13/0.79	0.26	1.60	27.3	26.6	2.00
ТМ-25/6	25	6/0.4	34.56/64.8	0.69	1.30	26.8	26.3	3.20
ТМ-1000/6	1000	6/0.4	0.43/1.98	0.35	1.59	27.3	26.6	1.50
ТМ-4000/6	4000	6/0.4	0.08/0.59	0.26	1.89	27.6	26.8	0.90
ТМ-25/10	25	10/0.4	96/180	0.69	1.30	26.8	26.3	3.20
ТМ-1600/10	1600	10/0.4	0.64/3.44	0.30	1.59	27.3	26.6	1.30
ТМ-6300/10	6300	10/0.4	0.12/1.43	0.22	2.60	28.4	27.1	0.80
ТМ-100/35	100	35/0.4	241/796	0.57	1.88	27.5	26.7	2.60
ТМН-4000/35	4000	35/6.3	2.6/23	0.25	2.17	27.9	27.0	1.00
ТРДНС-63000/35	63 000	36.75/6.3	0.1/2.5	0.14	3.37	29.2	27.5	0.30
ТМН-2500/110	2500	110/6.6	42.6/508.2	0.25	3.03	28.8	27.3	1.50
ТРДЦН-63000/110	63 000	115/6.3	0.87/22	0.12	3.03	28.8	27.7	0.60
ТДЦ-400000/110	400 000	121/20	0.08/3.8	0.06	3.00	28.8	27.4	0.45
ТРДН-40000/220	40 000	230/6.6	5.6/158.7	0.12	3.46	29.3	27.6	0.90
ТРДЦН-1000000/220	1 000 000	230/38.5	1.9/63.5	0.10	3.47	29.3	27.6	0.70
ТЦ-10000000/220	1 000 000	242/24	0.2/6.7	0.10	3.30	29.1	27.5	0.35

В качестве примера приведен расчет значений величин и параметров трансформатора ТМ-40/3, паспортные данные которого представлены в табл. 1.

Согласно исходным данным табл. 1, номинальные токи обмоток

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{40\,000}{\sqrt{3} \cdot 3000} = 7.69 \text{ А};$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{2H}} = \frac{40\,000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 57.7 \text{ А}.$$

Активные и индуктивные сопротивления первичной и приведенной вторичной обмоток соответственно равны

$$r_1 = r'_2 = \frac{r_k}{2} = 2.48 \text{ Ом};$$

$$x_1 = x'_2 = \frac{x_k}{2} = \frac{10.13}{2} = 5.07 \text{ Ом}.$$

Падения напряжений в первичной и приведенной вторичной обмотках:

$$I_1 x_1 = I'_2 x'_2 = 7.69 \cdot 5.07 = 39 \text{ В};$$

$$I_1 r_1 = I'_2 r'_2 = 7.69 \cdot 2.48 = 19 \text{ В}.$$

Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{3000}{400} = 7.5.$$

Падения напряжений в первичной и приведенной вторичной обмотках, в процентах от U_{1H} ($I_1 x'_1, I_1 r_1$), U'_{2H} ($I'_2 x'_2, I'_2 r'_2$):

$$I_1 x_1 = I'_2 x'_2 = \frac{39}{3000} \cdot 100 = 1.3;$$

$$I_1 r_1 = I'_2 r'_2 = \frac{19}{3000} \cdot 100 = 0.63.$$

Приведенное сопротивление нагрузки:

$$Z'_H = Z_H k^2 = \frac{U_{2H}}{I_{2H}} k^2 = \frac{400}{57.7} 7.5^2 = 390 \text{ Ом}.$$

Зададим $\cos \varphi_2 = 0.9$.

Активные и индуктивные приведенные сопротивления нагрузки:

$$r'_H = Z'_H \cos \varphi_2 = 390 \cdot 0.9 = 351 \text{ Ом};$$

$$x'_H = \sqrt{(Z'_H)^2 - (r'_H)^2} = 170 \text{ Ом}.$$

Исходя из заданного характера нагрузки, углы φ_1 и ψ_1 (см. рис. 1)

$$\varphi_1 = \arctg \frac{x_k + x'_H}{r_k + r'_H} = \arctg \frac{10.13 + 170}{4.95 + 351} =$$

$$= \arctg 0.506 = 26.8^\circ;$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_k/2 + x'_H}{r_k/2 + r'_H} = \arctg \frac{5.07 + 170}{2.48 + 351} =$$

$$= \arctg 0.495 = 26.3^\circ.$$

Результаты расчета параметров остальных рассмотренных силовых трансформаторов сведены в табл. 2.

Из анализа результатов расчета можно сделать вывод, что векторные диаграммы силовых трансформаторов невозможно использовать при практических расчетах, так как они не позволяют определять значения величин, характеризующих работу трансформатора, поскольку невозможно с необходимой для расчетов точностью изобразить все векторы на одной диаграмме.

1. Падения напряжений в первичной и вторичной обмотках составляют менее одного процента от напряжения сети и, соответственно, приведенного напряжения вторичной обмотки.

2. Вектор тока холостого хода составляет единицы процента, а при средних и больших мощностях трансформатора – менее одного процента от номинального тока.

3. Значения углов φ_1 и ψ_2 равны с точностью до градуса.

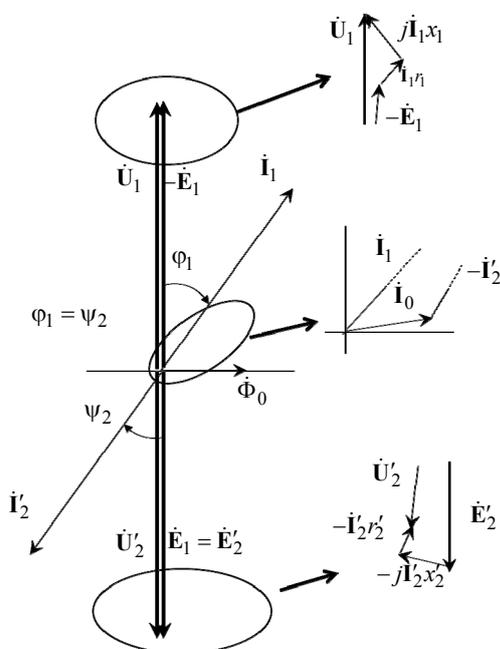


Рис. 2. «Реальная» векторная диаграмма силового трансформатора
Fig. 2. «Real» vector diagram of a power transformer

«Реальная» векторная диаграмма, учитывающая реальные соотношения между векторами величин и параметров силовых трансформаторов, представлена на рис. 2.

На рис. 2 сделаны выноски, в которых в сильно увеличенном масштабе показаны фрагменты, которые в силу своей малости не смогли найти отражения на основной векторной диаграмме.

Как уже было отмечено, проведенный анализ показал идентичность, полную аналогию как излагаемых методов построения векторных диаграмм силовых трансформаторов, так и полученных результатов.

Согласно [1]–[8] векторные диаграммы трансформатора в режиме холостого хода строятся на основании уравнения равновесия напряжения его первичной обмотки

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1\dot{I}_0 + r_1\dot{I}_0, \quad (1)$$

где $\dot{U}_1 = \dot{U}_c$ – напряжение первичной обмотки трансформатора, всегда равное напряжению питающей сети; \dot{E}_1 – противоЭДС самоиндукции первичной обмотки; \dot{I}_0 – ток холостого хода; x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; r_1 – активное сопротивление первичной обмотки.

Построение векторных диаграмм, согласно [1], [3]–[8], начинается с изображения вектора магнитного потока в сердечнике трансформатора $\dot{\Phi}_0$, который откладывают горизонтально по оси абсцисс. Дальнейший порядок, логика и правила построения общеизвестны и наглядно иллюстрируются следующей цепочкой последовательных векторов

$$\dot{\Phi}_0 \rightarrow \dot{I}_{0r} \rightarrow \dot{I}_{0a} \rightarrow \dot{I}_0 \rightarrow \dot{E}_1 =$$

$$= \dot{E}'_2 \rightarrow -\dot{E}_1 \rightarrow \dot{I}_0 r_1 \rightarrow j\dot{I}_0 x_1 \rightarrow \dot{U}_1 = \dot{U}_c, \quad (2)$$

где $\dot{I}_{0r}, \dot{I}_{0a}$ – реактивная и активная составляющие тока холостого хода соответственно; \dot{E}'_2 – приведенная ЭДС вторичной обмотки трансформатора. Результат построения показан на рис. 3

Обычно построение векторных диаграмм начинается с базового вектора, длина и положение на плоскости которого не изменяются от режимов и условий работы и не зависят от параметров рассматриваемого устройства, в данном случае – трансформатора. Закономерно возникает вопрос, почему вектор магнитного потока принят за базовый, несмотря на то, что его длина может незначительно, но все же изменяться в зависимо-

сти от уровня и характера нагрузки трансформатора. Единственный вектор, удовлетворяющий требованиям базового, – это вектор приложенного напряжения (напряжения сети), он же вектор напряжения первичной обмотки.

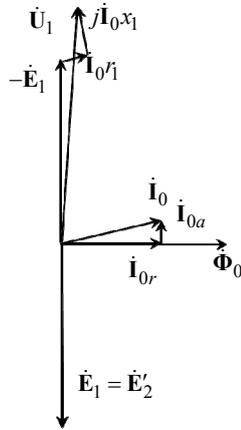


Рис. 3. Векторная диаграмма силового трансформатора в режиме холостого хода
Fig. 3. Vector diagram of a power transformer in idle mode

Порядок построения диаграмм (2) приводит к ошибочному пониманию причинно-следственных связей между физическими процессами в трансформаторе. Из (2) следует, что сумма противоЭДС первичной обмотки ($-\dot{E}_1$) и падений напряжений $\dot{I}_0 r_0$, $j\dot{I}_0 x_0$ определяют длину и положение вектора напряжения первичной обмотки трансформатора $\dot{U}_1 = \dot{U}_c$. В действительности из логики объяснения принципа работы трансформатора в режиме холостого хода следует, что подведенное к первичной обмотке трансформатора напряжение сети уравнивается противоЭДС и падениями напряжений. Это напряжение определяет ток холостого хода, магнитный поток и, следовательно, ЭДС обмоток трансформатора. Вектор этого напряжения должен быть задан до построения остальных векторов диаграммы и не может изменяться ни по значению, ни по фазе в результате построения.

Необходимо отметить, что указанный порядок построения диаграмм (2), при определенных соотношениях активного и индуктивного сопротивлений рассеяния обмоток трансформатора может привести к тому, что реактивная составляющая тока холостого хода \dot{I}_{0r} , протекающая под действием напряжения $\dot{U}_1 = \dot{U}_c$, оказывается сдвинутой относительно этого напряжения на угол,

отличный от 90° , рис. 1, 3. Кроме этого, активная составляющая указанного тока \dot{I}_{0a} оказывается не в фазе со своим напряжением.

Указанные факты противоречат принятым физическим представлениям и правилам электротехники.

Работа силового трансформатора в режиме нагрузки описывается уравнениями [4]

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}'_2 - r'_2 \dot{I}'_2 - jx'_2 \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2), \end{cases} \quad (3)$$

где \dot{U}'_2 – приведенное напряжение вторичной обмотки; \dot{E}'_2 – приведенная ЭДС взаимной индукции; \dot{I}'_2 – приведенный ток вторичной обмотки; x'_2 – приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки; r'_2 – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки.

Порядок построения векторных диаграмм в режиме нагрузки [1], [3]–[8] аналогичен порядку построения в режиме холостого хода и описывается следующей последовательностью изображения векторов (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_c &\rightarrow \dot{I}_{0r} \rightarrow \dot{I}_{0a} \rightarrow \dot{I}_0 \rightarrow \dot{E}_1 = \\ &= \dot{E}'_2 \rightarrow \dot{I}'_2 \rightarrow \dot{I}'_2 r'_2 \rightarrow j\dot{I}'_2 x'_2 \rightarrow \\ &\rightarrow \dot{U}'_2 \rightarrow -\dot{I}'_2 \rightarrow \dot{I}_1 \rightarrow \\ &\rightarrow -\dot{E}_1 \rightarrow \dot{I}_1 r_1 \rightarrow j\dot{I}_1 x_1 \rightarrow \dot{U}_1. \end{aligned}$$

Все критические замечания, отмеченные относительно построения векторных диаграмм для режима холостого хода трансформаторов, остаются актуальными и при построении векторных диаграмм трансформаторов, работающих под нагрузкой. В дополнение можно отметить, что из [3], [5]–[8] следует, что с изменением характера нагрузки меняются значения и фазы падений напряжений $\dot{I}_1 r_1$ и $j\dot{I}_1 x_1$, что приводит к изменению значения и фазы напряжения сети \dot{U}_1 . Указанный факт противоречит представлению о независимости и постоянстве напряжения $\dot{U}_1 = \dot{U}_c$.

В [1]–[8] указано, что векторные диаграммы – это наглядные учебно-методические интерпретации основных уравнений трансформатора и с их помощью можно пояснять работу трансформаторов в различных режимах и при различной нагрузке. С этим утверждением трудно не согласиться, несмотря на поднятые в статье вопросы о

логичности, однозначности и корректности применяемого метода их построения.

Учебно-методическая ценность векторных диаграмм должна существенно повыситься, если методика их построения и получаемые результаты будут отвечать следующим требованиям:

1. Построение векторных диаграмм и полученные результаты должны соответствовать правилам построения векторных диаграмм, которые подробно рассмотрены в теоретической электротехнике.

2. Порядок и логика построения векторных диаграмм должны соответствовать порядку и общепринятой логике изложения принципа работы трансформаторов как в режиме холостого хода, так и в нагрузочном режиме при различном характере нагрузки.

3. Векторные диаграммы должны быть наглядными, что может быть достигнуто необходимым для построения увеличением модулей отдельных векторов, поскольку их действительные значения очень малы по сравнению с размерами большинства векторов, представленных на диаграмме.

4. По возможности, векторные диаграммы должны содержать векторы всех физических величин, которые употребляются для объяснения принципа работы трансформаторов и анализа его режимов работы.

Перечисленные требования достигаются применением предлагаемого нового подхода к построению векторных диаграмм.

При построении векторной диаграммы за базовый вектор принят вектор первичного напряжения (рис. 4). В рассматриваемом режиме холостого хода вектор тока холостого хода \dot{I}_0 отстает от вектора напряжения на угол φ_0 . Вектор тока холостого хода \dot{I}_0 имеет две составляющие – активную \dot{I}_{0a} , находящуюся в фазе с напряжением \dot{U}_c , и реактивную (или намагничивающую) \dot{I}_{0r} , отстающую от напряжения \dot{U}_c на 90° . Реактивная составляющая создает основной магнитный поток $\dot{\Phi}_0$ в сердечнике трансформатора, вектор которого находится с ней в фазе и отстает от вектора напряжения \dot{U}_1 на угол 90° . Согласно уравнению напряжений трансформатора в режиме холостого хода (1) и принципу работы трансформатора, приложенное к первичной обмотке

напряжение $\dot{U}_1 = \dot{U}_c$ уравнивается противоЭДС самоиндукции ($-\dot{E}_1$) и падениями напряжений $r_1 \dot{I}_0$ и $jx_1 \dot{I}_0$.

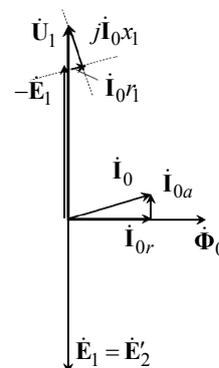


Рис. 4. Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода, построенная по предлагаемому подходу

Fig. 4. Vector diagram of the transformer in idle mode, constructed according to the proposed approach

Для изображения указанных векторов на диаграмме от конца вектора напряжения проводим пунктирную линию, перпендикулярную вектору тока холостого хода, и вдоль нее откладываем вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния первичной обмотки, причем модуль вектора выбираем произвольно, и так, чтобы векторная диаграмма была наглядной и понятной. Как уже было сказано, в действительности модули векторов падений напряжений весьма малы и их действительные значения не позволяют отложить их на диаграмме.

Далее из начала вектора $jx_1 \dot{I}_0$ перпендикулярно ему проводим вторую пунктирную линию, и вдоль нее, от начала указанного вектора до точки пересечения с вектором напряжения, строим вектор падения напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки. Указанная точка пересечения будет определять конец вектора противоЭДС ($-\dot{E}_1$), а его начало расположится в начале координат векторной диаграммы. Следует особо отметить, что вектор противоЭДС первичной обмотки трансформатора ($-\dot{E}_1$) должен совпадать по фазе с вектором напряжения первичной обмотки $\dot{U}_1 = \dot{U}_c$. В противном случае нарушается известное правило об отставании вектора ЭДС от вектора магнитного потока, который навел ЭДС, на 90° . Завершается построение векторной диаграммы изображением вектора ЭДС взаимной

индукции приведенной вторичной обмотки \dot{E}'_2 , который по длине равен вектору $(-\dot{E}_1)$ и находится с ним в противофазе, или, что то же самое, отстает от вектора магнитного потока на угол 90° .

В итоге порядок построения векторной диаграммы в режиме холостого хода можно представить следующей последовательностью изображения векторов:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = \dot{U}_c \rightarrow \dot{I}_0 \rightarrow \dot{I}_{0r} \rightarrow \dot{I}_{0a} \rightarrow \dot{\Phi}_0 \rightarrow \\ \rightarrow j\dot{I}_{0x1} \rightarrow \dot{I}_{0l1} \rightarrow -\dot{E}_1 \rightarrow \dot{E}'_1 = \dot{E}'_2. \end{aligned}$$

При работе трансформатора на активно-индуктивную нагрузку, как и в случае холостого хода, за базовый вектор принят вектор напряжения сети $\dot{U}_c = \dot{U}_1$ (рис. 5). Под действием напряжения сети в первичной обмотке протекает ток холостого хода \dot{I}_0 активно-индуктивного характера, имеющий две составляющие – активную \dot{I}_{0a} , совпадающую по фазе с напряжением, и реактивную \dot{I}_{0r} , отстающую на 90° . Реактивная составляющая создает магнитный поток $\dot{\Phi}_0$, вектор которого находится с ней в фазе, т. е. отстает от вектора напряжения на 90° .

Вертикально вниз от начала координат проводим пунктирную линию, вдоль которой, после определения модуля в результате построений, будет проведен вектор ЭДС $\dot{E}'_1 = \dot{E}'_2$, отстающий от вектора магнитного потока на 90° . Приведенный ток вторичной обмотки \dot{I}'_2 отстает от вектора ЭДС на угол ψ_2 , зависящий от характера нагрузки. Используя уравнения токов из системы уравнений (3), находим вектор тока первичной обмотки \dot{I}_1 . Далее, по методике, изложенной при построении векторной диаграммы в режиме холостого хода, от конца вектора напряжения первичной обмотки откладываем падения напряжений $jx_1\dot{I}_1$, $r_1\dot{I}_1$ и определяем модуль вектора $(-\dot{E}_1)$. Векторы ЭДС самоиндукции первичной обмотки и приведенной ЭДС взаимной индукции вторичной обмотки, $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$, направляем вдоль пунктирной линии, которая была проведена ранее.

Положение вектора приведенного напряжения вторичной обмотки \dot{U}'_2 находим, отложив угол φ_2 от вектора тока \dot{I}'_2 . Для нахождения его мо-

дуля, используя правила построения векторных диаграмм, из конца вектора $\dot{E}'_1 = \dot{E}'_2$ проводим пунктирную линию, перпендикулярную вектору тока \dot{I}'_2 , и вдоль нее откладываем вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния приведенной вторичной обмотки $(-j\dot{I}'_2x'_2)$, причем модуль вектора выбираем произвольно и так, чтобы векторная диаграмма была наглядной и понятной.

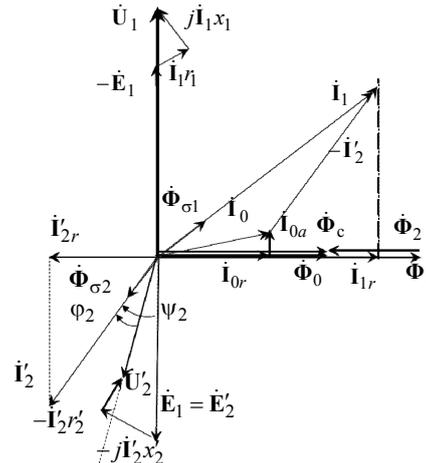


Рис. 5. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Fig. 5. Vector diagram of a transformer under active-inductive load

Далее, из конца вектора $(-j\dot{I}'_2x'_2)$ перпендикулярно ему проводим вторую пунктирную линию, и вдоль нее, от конца указанного вектора до точки пересечения с линией положения вектора \dot{U}'_2 , проводим вектор падения напряжения на активном сопротивлении приведенной вторичной обмотки $(-r'_2\dot{I}'_2)$. Указанная точка пересечения будет определять конец вектора приведенного напряжения вторичной обмотки \dot{U}'_2 , а его начало будет находиться в начале координат диаграммы.

Векторная диаграмма станет более информативной полной и логично завершенной, если на ней будут изображены векторы магнитных потоков.

Вектор магнитного потока $\dot{\Phi}_0$ в режиме холостого хода уже нанесен на диаграмму. Вектор магнитного потока вторичной обмотки трансформатора $\dot{\Phi}_2$ совпадает по фазе с вектором реактивной составляющей тока приведенной вторичной обмотки, который в свою очередь отстает от вектора \dot{E}'_2 на 90° . Вектор магнитного потока первичной обмотки $\dot{\Phi}_1$ находится в противофазе

с вектором $\dot{\Phi}_2$, в фазе – с вектором реактивной составляющей тока первичной обмотки, и отстает от вектора приложенного напряжения $\dot{U}_c = \dot{U}_1$ на 90° . Модули векторов магнитных потоков выбираются таким образом, чтобы выполнялось известное из теории трансформаторов уравнение

$$\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 = \dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_c.$$

Кроме основного магнитного потока $\dot{\Phi}_c$ на диаграмме показаны векторы магнитных потоков рассеяния $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ и $\dot{\Phi}_{\sigma 2}$ первичной и вторичной обмоток трансформатора соответственно. Эти потоки не участвуют в передаче энергии от первичной обмотки трансформатора ко вторичной, но наводят в них ЭДС самоиндукции, которые уже учтены на диаграмме, векторами падения напряжений $(-j\dot{I}_1 x_1)$ и $(-j\dot{I}'_2 x'_2)$ на индуктивных сопротивлениях рассеяния обмоток. Поскольку сами потоки или полностью, или в значительной степени замыкаются по воздуху, то их векторы по направлению совпадают с векторами токов \dot{I}_1 и \dot{I}'_2 соответственно. При этом потерями в стали сердечника трансформатора от этих потоков при построении векторной диаграмме пренебрегаем ввиду их чрезмерной малости.

Методика построения векторных диаграмм при активно-емкостной нагрузке будет идентична, различия будут лишь в положении векторов токов приведенных вторичной и первичной обмо-

ток, а также в направлениях магнитных потоков, созданных этими токами.

Выводы. Проведенный анализ научнотехнической и учебно-методической литературы, посвященной методам построения и использованию векторных диаграмм силовых трансформаторов, показал следующее:

1. Вопрос об применимости векторных диаграмм в практических расчетах остается открытым.

2. Вызывает сомнение логичность и корректность применяемого метода их построения. Применяемый порядок построения диаграмм приводит к ошибочному пониманию причинно-следственных связей между физическими процессами в трансформаторе, противоречит принятым физическим представлениям и правилам электротехники.

На основании проведенных расчетов показано, что векторные диаграммы силовых трансформаторов невозможно использовать при практических расчетах, так как они не позволяют определять значения величин, характеризующих работу трансформатора, поскольку невозможно с необходимой для расчетов точностью изобразить все векторы на одной диаграмме.

Сформулированы требования, которым должны отвечать векторные диаграммы для их эффективного применения с учебно-методическими целями.

Перечисленные требования достигаются применением предлагаемого нового подхода к построению векторных диаграмм.

Список литературы

1. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. 432 с.
2. Анализ работы трансформатора под нагрузкой / В. В. Троценко, А. А. Бабарико, А. Ю. Зогина, Е. Ю. Мирошник // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК: Сб. Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. Омск: Омский гос. аграрный ун-т им. П. А. Столыпина, 2021. С. 455–460.
3. Ванурин В. Н. Электрические машины: СПб.: Лань, 2016. 304 с.
4. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2008. 350 с., ил.
5. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: учеб. для вузов; в 2 т. Т. 1. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 652 с.
6. Гольдберг О. Д., Хелемская С. П. Электромеханика: учеб. для студ. вузов / под ред. О. Д. Гольдберга. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 512 с.
7. Петров Г. Н. Электрические машины. Введение. Трансформаторы: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1974. 240 с.
8. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2004. 607 с.
9. Чебоксарские трансформаторы. Маркетплейс. URL: <https://www.cheb-transformator.com/catalog/tm> (дата обращения 11.08.2022).

Информация об авторах

Лавров Анатолий Георгиевич – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доцент.
E-mail: angelavr@mail.ru

Васильев Вадим Александрович – студент гр. 9405 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vva09001@gmail.com

References

1. Vasjutinskij S. B. Voprosy teorii i rascheta transformatorov. L.: Jenergija, 1970. 432 s. (In Russ.).
2. Analiz raboty transformatora pod nagruzkoj / V. V. Trocenko, A. A. Babariko, A. Ju. Zogina, E. Ju. Miroshnik // Rol' nauchno-issledovatel'skoj raboty obuchajushhsja v razvitii APK: Sb. Vserossijskoj (nacional'noj) nauch.-prakt. konf. Omsk: Omskij gos. agrarnyj un-t im. P. A. Stolypina, 2021. S. 455–460. (In Russ.).
3. Vanurin V. N. Jelektricheskie mashiny: SPb.: Lan', 2016. 304 s. (In Russ.).
4. Vol'dek A. I., Popov V. V. Jelektricheskie mashiny. Vvedenie v jelektromehaniku. Mashiny postojannogo toka i transformatory: ucheb. dlja vuzov. SPb.: Piter, 2008. 350 s., il. (In Russ.).
5. Ivanov-Smolenskij A. V. Jelektricheskie mashiny: ucheb. dlja vuzov: v 2 t. T. 1. 3-e izd., stereot. M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2006. 652 s. (In Russ.).
6. Gol'dberg O. D., Helemskaja S. P. Jelektromehnika: ucheb. dlja stud. vuzov / pod red. O. D. Gol'dberga. M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2007. 512 s. (In Russ.).
7. Petrov G. N. Jelektricheskie mashiny. Vvedenie. Transformatory: ucheb. dlja vuzov. M.: Jenergija, 1974. 240 s. (In Russ.).
8. Kopylov I. P. Jelektricheskie mashiny. Uchebnik dlja vuzov. M.: Vyssh. shk., 2004. 607 s. (In Russ.).
9. Cheboksarskie transformatory. Marketplejs. URL: <https://www.cheb-transformator.com/catalog/tm> (data obrashhenija 11.08.2022). (In Russ.).

Information about the authors

Anatoly G. Lavrov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University, Associate Professor.
E-mail: angelavr@mail.ru

Vadim A. Vasiliev – student of gr. 9405 of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: vva09001@gmail.com

Статья поступила в редакцию 06.12.2022; принята к публикации после рецензирования 27.12.2022; опубликована онлайн 28.02.2023.

Submitted 06.12.2022; accepted 27.12.2022; published online 28.02.2023.
