

УДК 621.314

## ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ РАССЕЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ЭТИХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ

Билоус О.А.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
Пермь, e-mail: boa@msa.pstu.ac.ru

На основании теоретически доказанной неоднозначности влияния вторичной и первичной индуктивностей рассеяния питающего трансформатора тиристорного преобразователя на процесс коммутации токов в фазах вторичных обмоток предложен экспериментальный метод определения величины первичного и вторичного индуктивного сопротивлений рассеяния питающего трансформатора. Для выполнения опыта используется экспериментальный тиристорный электропривод постоянного тока. В качестве нагрузки тиристорного преобразователя используется электродвигатель постоянного тока. В результате двух этапов опыта определяются величины действующего значения линейного напряжения, тока нагрузки, углов управления и коммутации, а также мгновенные значения выпрямленного напряжения в зоне коммутации. Это позволяет вычислить совместное индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора и сети, индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора и сети, а затем величины первичного и вторичного индуктивного сопротивлений рассеяния питающего трансформатора. От этих значений зависит степень воздействия на питающую сеть тиристорного электропривода и выбор правильного соотношения мощностей электропривода и сети.

**Ключевые слова:** электропривод, тиристорный преобразователь, коммутация токов, первичная и вторичная индуктивности рассеяния

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PRIMARY AND SECONDARY INDUCTANCE OF POWER TRANSFORMER CONSIDERING SOME AMBIGUITY OF INDUCTANCE VALUES

Bilous O.A.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: boa@msa.pstu.ac.ru

Based on theoretically approved ambiguity of influence of primary and secondary dispersion inductance of thyristor converter transformer on the process of current commutation in the phases of secondary windings, experimental method of determination of primary and secondary dispersion induction resistance of transformer, has been offered. An experimental thyristor constant current electric drive has been used for the test. A constant current electric engine has been used as a working load for the thyristor converter. As a result of the two-staged test the following values have been determined: working linear voltage, working load current, the angles of control and commutation, and also instant values of rectified voltage in the commutation area. It allows to calculate mutual inductive dispersion resistance of the transformer and the circuit, inductive resistance of short-circuit of the transformer, and then the values of primary and secondary inductive dispersion resistance of power transformer. The extent of influence of the transformer on the thyristor electric drive power supply circuit, and therefore, the right choice of power ratio of electric drive and the power circuit, depend on these values.

**Keywords:** electric drive, thyristor converter, current commutation, primary and secondary dispersion inductance

Работающий тиристорный электропривод оказывает на питающую сеть неблагоприятное воздействие. Одним из видов такого воздействия являются высокочастотные искажения напряжения питания. В синусоидальном напряжении сети появляются так называемые коммутационные провалы, оказывающие на другие потребители электрической энергии вредное влияние. Основным фактором, определяющим глубину этих провалов, является величина индуктивности сети, которая, в свою очередь, зависит от соотношения первичных и вторичных индуктивностей рассеяния питающего трансформатора [2, 3]. Соотношение первичных и вторичных индуктивностей рассеяния питающих трансформаторов также важно знать при расчетах электропривода переменного тока. Проблему можно решить, используя теорию неоднозначности

составляющих индуктивностей рассеяния трансформаторов.

### Экспериментальное определение характеристик коммутации вентиляей

При исследовании можно пренебречь активными сопротивлениями обмоток трансформаторов и падением напряжения в вентилях при протекании по ним рабочего тока. Для выполнения опыта используется экспериментальный тиристорный электропривод постоянного тока (рис. 1), питаемый от трансформатора, в котором определяется соотношение первичных и вторичных индуктивностей рассеяния. В качестве нагрузки тиристорного преобразователя используется электродвигатель постоянного тока (ДПТ). Его мощность может быть в несколько раз меньше мощности электропривода, который будет установлен в действительности для ре-

ализации нужной технологии. Должна быть предусмотрена возможность плавно регулировать вращающий момент ДПТ. Для этого вал двигателя механически соединяется с валом генератора (ГПТ), тормозной момент которого плавно регулируется.

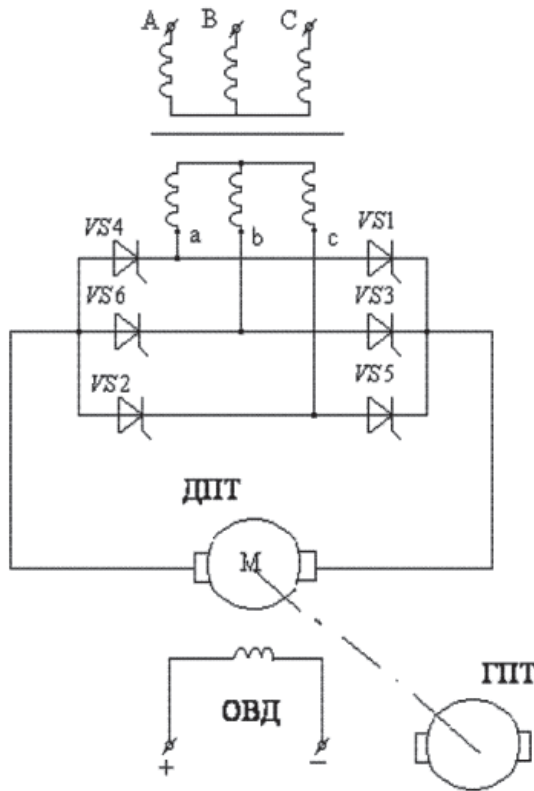


Рис. 1. Трехфазная электрическая схема ТП для снятия характеристик коммутации вентилей

Первый этап эксперимента – определение совместного индуктивного сопротивления рассеяния трансформатора и сети ( $\chi_\gamma$ ), влияющего на процесс коммутации фазных токов. Производится разгон электропривода до максимально возможной скорости. При этом угол управления ТП должен быть близок к нулевому значению ( $\alpha \approx 0$ ). Затем осуществляется увеличение момента сопротивления на валу двигателя путем воздействия на тормозной момент генератора. Ток нагрузки устанавливается приблизительно на уровне  $I_{d\text{ном}}$  двигателя. Снимаются замеры: действующее значение линейного напряжения питания тиристорного преобразователя  $U_2$ , тока нагрузки двигателя  $I_d$  и по осциллографу, включенному на напряжение нагрузки, измеряются величины угла управления  $\alpha$  и угла коммутации  $\gamma$ . По этим данным, используя формулу

$$\cos \alpha - \cos(\alpha - \gamma) = \frac{\chi_\gamma I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}$$

определяется индуктивное сопротивление коммутирующего контура  $\chi_\gamma$ .

Если  $\alpha = 0$ , величина  $\chi_\gamma$  определяется по более простой формуле:

$$\chi_\gamma = \frac{\sqrt{2} U_2 (1 - \cos \gamma)}{2 I_d}$$

Индуктивное сопротивление  $\chi_\gamma$  определяет процесс коммутации токов с учетом неоднозначности составляющих суммарного индуктивного сопротивления  $\chi_2$  и  $\chi_{1\Sigma}$ . Для определения индуктивного сопротивления короткого замыкания трансформатора и сети нужно знать величину отношения:

$$\frac{\chi_2}{k_T^2 \chi_{1\Sigma}} = N_{k\gamma}$$

Здесь  $\chi_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния вторичных обмоток трансформатора;  $k_T = \frac{w_2}{w_1}$  – коэффициент трансформации питающего трансформатора;  $\chi_{1\Sigma}$  – суммарное индуктивное сопротивление первичных обмоток трансформатора с индуктивным сопротивлением сети

$$\chi_{1\Sigma} = \chi_{1TP} + \chi_c$$

Для вычисления  $N_{k\gamma}$  производится второй этап эксперимента. Воздействуя на СИФУ ТП, угол управления  $\alpha$  устанавливается равным  $\frac{\pi}{2}$ . При этом  $U_d = 0$  и  $I_d = 0$ .

Эксперимент проводится при неподвижном заторможенном якоре электродвигателя. Затем, постепенно уменьшая угол  $\alpha$ , увеличивают ток якоря до значения, при котором он становится непрерывным, а на экране осциллографа, включенного на напряжение нагрузки, отчетливо просматривается коммутация токов в виде кратковременного импульса. В трехфазной мостовой схеме мгновенные значения выпрямленного напряжения  $u_b$  в зоне коммутации не равны полусумме ЭДС коммутируемых фаз [1]. Напряжение  $u_b$  смещается в отрицательную или в положительную сторону от среднего значения. Эти смещения чередуются в четных и нечетных импульсах пульсаций напряжения. В рассматриваемой схеме на каждом такте переключений в коммутации участвуют две фазы. Одна из них коммутирует с отставанием от предыдущей коммутации этой фазы на угол  $\Psi_1 = 60^\circ$ , другая – на угол  $\Psi_2 = 120^\circ$ .

На рис. 2 приведена диаграмма напряжения на нагрузке, имеющая место в этой схеме при переключениях фаз ( $\alpha \approx 90^\circ$ ). Участвующие в коммутациях фазы обозначены  $a, b, c$ . Дальше от нулевой линии

коммутирует фаза с отставанием на данном такте от предыдущей коммутации этой фазы на угол  $\Psi_1 = 60^\circ$ , ближе к нулевой линии – фаза с отставанием  $\Psi_2 = 120^\circ$ . Величина индуктивности коммутирующего

контура в соответствии с [1] определяется выражением:

$$L_\gamma = L_k \frac{3N_L + 2(\cos \Psi - 1)^2}{3(N_L + 1)}.$$

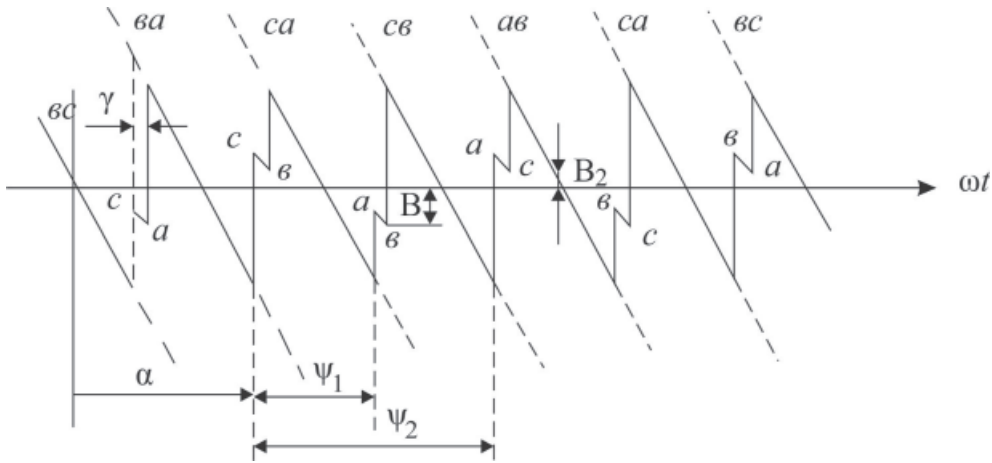


Рис. 2. Диаграмма напряжения на нагрузке в трехфазном мостовом ТП при  $\alpha \approx 90^\circ$

Из этого выражения видно, что  $L_\gamma$  зависит от значения угла  $\Psi$ . В процессе одной коммутации  $L_\gamma$  не остается постоянной величиной и, следовательно, в соответствии с [1] меняется темп изменения токов  $\frac{di_l}{dt}$  и  $\frac{di_n}{dt}$ . Строго говоря, в коммутации участвуют две фазы одновременно, но на первом этапе влияние фазы, имеющей сдвиг  $\Psi_2 = 120^\circ$ , незначительно по сравнению с быстродействующей фазой. Здесь  $u_b$  максимально отстоит от нулевой линии. На

втором этапе влияние этой фазы уже завершается и процесс коммутации определяется «медленнодействующей» фазой. Величина  $u_b$  становится ближе к нулевому значению.

По диаграмме напряжения на нагрузке определяется значение  $u_b$ . Для этого используются большие отклонения от среднего значения напряжения, имеющие место при  $\Psi_1 = 60^\circ$ . Для удобства измерения мгновенного напряжения на экране осциллографа, изменив развертку изображения во времени, совмещают четные и нечетные импульсы пульсаций [1] (рис. 3).

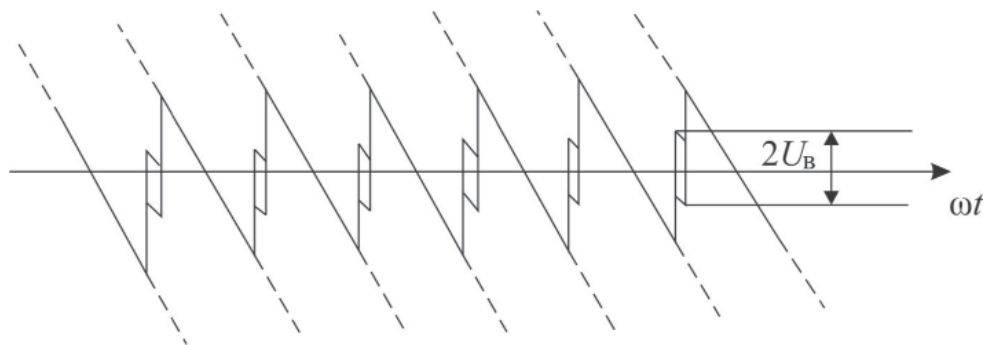


Рис. 3. Диаграмма напряжения при совмещении четных и нечетных импульсов пульсаций

Измерив величину  $2u_b$ , определяется в вольтах значение  $u_b$ . По значениям  $u_2$  и  $u_b$  определяется  $N_{k\gamma}$ . В работе [1] получены

уравнения, в которых содержится параметр  $N_{k\gamma}$ . Для его определения решается одно из этих уравнений относительно  $N_{k\gamma}$ . Получаем:

$$N_{k\gamma} = \frac{4((e'_n + e'_l \cos^2 \Psi_l) - u_b(1 - \cos \Psi_l)^2 - (e'_n + e'_l) \cos \Psi_l)}{6u_b - 3(e'_n + e'_l)}. \quad (*)$$

При  $\alpha \approx \frac{\pi}{2}$  и  $e'_n = e'_l$  формула (\*) упрощается:

$$N_{k\gamma} = \frac{2e'_n(1 - \cos^2 \Psi_l) - 2u_b(1 - \cos \Psi_l)^2}{3u_b}.$$

Для трехфазной мостовой схемы тиристорного преобразователя  $\Psi_l = \frac{2\pi}{6}$ ,  $e'_n = 0,5u_{2\max}$  и выражения становятся еще проще:

$$N_{k\gamma} = \frac{0,75\sqrt{2}u_2 - 0,5u_b}{3u_b}.$$

Вторичное индуктивное сопротивление питающего трансформатора определяется по формуле:

$$\chi_2 = \frac{N_{k\gamma}\chi_\gamma}{N_{k\gamma} + 1}.$$

Следующий этап – теоретическое исследование изолированной системы электропривода. Исходя из каталожных данных питающего трансформатора, определяется индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора  $\chi_{kTP}$ . Затем определяется индуктивное сопротивление коммутирующего контура для трансформатора, питающегося от сети бесконечно большой мощности:

$$\chi_{\gamma TP} = \frac{\chi_{kTP}(3N_{\gamma TP} + 2e(\cos \Psi_l - 1)^2)}{3(N_{\gamma TP} + 1)}.$$

Здесь величина  $N_{\gamma TP}$  определена из формулы:

$$N_{\gamma TP} = \frac{\chi_2}{\chi_{kTP} - \chi_2}.$$

Откуда:

$$\frac{\chi_2}{k_T^2\chi_1} = N_{\gamma TP}.$$

### Заключение

Таким образом, определены значения первичного и вторичного индуктивных сопротивлений рассеяния питающего трансформатора, от которых зависит выбор правильного соотношения мощностей электропривода.

### Список литературы

1. Билоус О.А., Иванов А.П. Индуктивное сопротивление сети переменного тока // Информационные управляющие системы: сб. научн. тр. – Пермь, 2004. – С. 36–42.
2. Билоус О.А., Сагизов Э.Б. Математическое моделирование влияния работы непосредственного преобразователя частоты на сеть электроснабжения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 8. – С. 106–113.
3. Иванов А.П., Билоус О.А. Анализ процессов коммутации в тиристорных преобразователях с учетом неоднозначности первичных и вторичных индуктивностей рассеяния питающих трансформаторов // Информационные управляющие системы: сб. научн. тр. – Пермь, 2002. – С. 11–21.
4. Кузнецов М.И., Ромодин А.В., Костыгов А.М. Экспериментальное исследование управления потоком реактивной мощности в системе с трехобмоточным трансформатором // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 46–50.
5. Ромодин А.В., Кузнецов М.И. Экспериментальное исследование управления потоком реактивной мощности в системе с двумя источниками питания // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 44–49.

### References

1. Bilous O.A., Ivanov A.P. Induktivnoe soprotivlenie seti peremennogo toka // Informatsionnye upravlyayushchie sistemy. 2004. pp. 36–42.
2. Bilous O.A., Sagizov E.B. Matematicheskoe modelirovaniye vliyaniya raboty neposredstvennogo preobrazovatelya chastoty na set elektrosnabzheniya // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2013. no. 8. pp. 106–113.
3. Ivanov A.P., Bilous O.A. Analiz protsessov kommutatsii v tiristornykh preobrazovatelyakh s uchetom neodnoznachnosti pervichnykh i vtorichnykh induktivnostey rassayaniya pitayushchikh transformatorov // Informatsionnye upravlyayushchie sistemy. 2002. pp. 11–21.
4. Kuznetsov M.I., Romodin A.V., Kostygov A.M. Eksperimentalnoe issledovanie upravleniya potokom reaktivnoy moshchnosti v sisteme s trekhobmotochnym transformatorom // Elektrotehnika. 2011. no. 11. pp. 46–50.
5. Romodin A.V., Kuznetsov M.I. Eksperimentalnoe issledovanie upravleniya potokom reaktivnoy moshchnosti v sisteme s dvumya istochnikami pitaniya // Elektrotehnika. 2010. no. 6. pp. 44–49.

### Рецензенты:

Казанцев В.П., д.т.н., доцент, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Бочкарев С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 18.04.2014.