

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Сафонов В.И.¹, Лонзингер П.В.², Константинов В.Д.¹

¹Южно-Уральский Государственный Университет (национальный исследовательский университет) ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), Филиал в г. Усть-Катав, г. Усть-Катав, Россия, (456040, Челябинская обл. г. Усть-Катав, ул. Центральная, 38) e-mail: ukf74@mail.ru

²Южно-Уральский Государственный Университет (национальный исследовательский университет) ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), г. Челябинск, Россия (454080, Челябинск, пр. Ленина 76) e-mail: admin@susu.ac.ru

Рассмотрена принципиальная схема трансформатора с векторным управлением, содержащего два активных преобразователя в цепи управления. Построена базовая математическая модель трансформатора при принятии допущений об отсутствии потоков рассеяния в главном и вольтодобавочном трансформаторах, бесконечной магнитной проницаемости их магнитопроводов, идеальности вентиляльных преобразователей и низкочастотных фильтров, а также бесконечности мощности короткого замыкания питающей сети. На основе модели построены зависимости активных и реактивных мощностей от напряжения питающей сети и показано, что трансформатор с векторным управлением позволяет осуществлять стабилизацию (регулирование) напряжения нагрузки и одновременно генерировать реактивную мощность. Для различных режимов работы нагрузки и сети сформулирован алгоритм выбора управляющих параметров и показана эффективность работы трансформатора в этих режимах.

Ключевые слова: силовой трансформатор, векторное управление, регулирование напряжения, генерация реактивной мощности.

THE OPERATION PRINCIPLE OF THE TRANSFORMER WITH VECTORIAL CONTROL

Safonov V.I.¹, Lohnsinger P.V.², Konstantinov V.D.¹

¹South Ural Stat University (Nathinal Research University). Branch in the city Ust-Katav, Ust-Katav, Russia (456040 Chelyabinsk region, Ust-Katav, str. Central, 38) ukf74@mail.ru

²South Ural Stat University (Nathinal Research University), Chelyabinsk, Russia (454080, Chelyabinsk, av. Lenina 76)e-mail: admin@susu.ac.ru

The principal scheme of the transformer with vectorial control was constructed. The scheme contains two active converters in control circuits. Assumptions used to create a basic mathematical model are: transformers' leakage fluxes equal to zero, a magnetic permeability of cores of general and booster transformers are infinite, semiconductor converters and low-frequency filters are ideal and a short-circuit duty of a power system is infinite. The mathematical model of the transformer was constructed. Plots of power network voltage dependences of active and reactive powers were shown using the mathematical model. The model shows a transformer's ability to stabilize (or to regulate) a voltage on a load and to generate a reactive power simultaneously. An algorithm of control parameters selecting for different load and network modes was formulated and an efficiency of functioning of the transformer in the modes was shown.

Keywords: power transformer, vectorial control, voltage regulation, generation of reactive power.

Введение

Регулирование напряжения силовых трансформаторов осуществляется путем механического переключения отпаек обмотки (РПН и ПБВ). Этот способ регулирования напряжения обладают рядом недостатков, таких как дискретность регулирования, невозможность компенсации реактивной мощности, износ трансформаторного масла и механических контактов и т.п. Ведется разработка альтернативных способов регулирования вторичных напряжений силовых трансформаторов. В [3] описан трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения. В [2] рассматривается устройство для плавного регулирования вторичного напряжения силового трансформатора, содержащее ведомый

сетью обратимый преобразователь, а также два автономных инвертора, работающих в 180-градусном режиме.

Материалы и методы исследования

На основании изложенных в [4] положений были разработаны несколько вариантов схем силовой части трансформатора с векторным управлением. Один из них представлен на рис. 1. Обмотка 4 служит для подключения нагрузки (сети низшего напряжения). Вольтодобавочный трансформатор 5 предназначен для согласования параметров силовых ключей преобразователя 11 с питающей сетью. Низкочастотные фильтры 8 и 9 представляют собой трехфазные Г – образные LC – фильтры. Конденсаторная батарея 13 звена постоянного тока 12 предназначена для обеспечения корректной работы преобразователей 10 и 11. Отличительной особенностью данной схемы, по сравнению с [2], является использование двух активных преобразователей в целях регулирования.

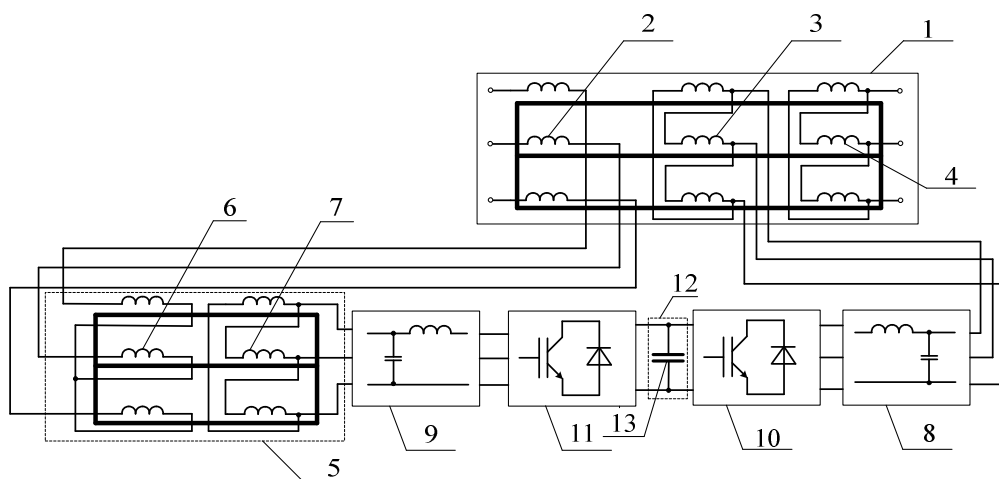


Рис. 1. Схема силовой части трансформатора с векторным управлением

1 – главный трансформатор; 2 – первичная обмотка; 3 – согласующая обмотка устройства векторного управления; 4 – вторичная обмотка; 5 – вольтодобавочный трансформатор; 6 и 7 – выходная и входная обмотки трансформатора 5 соответственно; 8 и 9 – низкочастотные фильтры; 10 и 11 – первичный и вторичный активные преобразователи соответственно; 12 – звено постоянного тока; 13 – конденсаторная батарея

При формировании базовой математической модели трансформатора с векторным управлением были приняты следующие допущения: трехфазная система симметрична; ключи активных преобразователей идеальны; потери активной мощности во всех элементах отсутствуют; намагничиванием сердечника и индуктивностями рассеяния трансформатора и питающей сети пренебрегаем.

Сделанные допущения позволяют выполнить исследование по схеме замещения для одной фазы. Звено, содержащее фильтры и активные преобразователи, заменено зависимыми источниками тока и напряжения с равными активными мощностями. При правильном

подборе [5] параметров фильтров в этих источниках можно учитывать только основные гармоники. Схема замещения трансформатора с векторным регулированием показана на рис. 2.

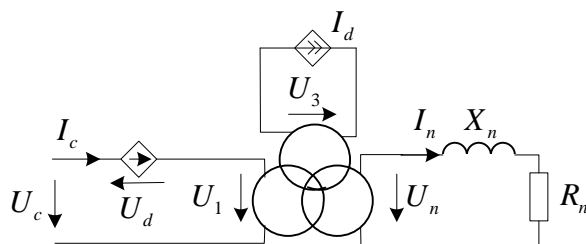


Рис. 2. Схема замещения трансформатора с векторным управлением

Закон полного тока для магнитной цепи силового трансформатора имеет вид

$$\dot{I}_c w_1 = \dot{I}_n w_2 + \dot{I}_d w_3, \quad (1)$$

где w_1 , w_2 и w_3 – количество витков обмоток. Закон Кирхгофа для стороны высокого напряжения имеет вид

$$\dot{U}_c + \dot{U}_d = \dot{U}_n w_1 / w_2. \quad (2)$$

По уравнениям (1) и (2) строим векторные диаграммы для случаев, когда действующее значение напряжения нагрузки необходимо увеличить (рис. 3а) и уменьшить (рис. 3б). Из векторной диаграммы видно, что через преобразователи 10 и 11 (см. рис. 1) передается активная мощность. В случае, когда необходимо увеличить действующее значение напряжения нагрузки (рис. 3а), активная мощность передается от источника тока к источнику напряжения (рис. 3в). В этом случае преобразователь 10 работает в режиме выпрямления, а преобразователь 11 – в режиме инвертирования. Если необходимо уменьшить напряжение нагрузки (рис. 3б), то направление передачи активной мощности противоположное и преобразователь 11 работает в режиме выпрямления, а преобразователь 10 – в режиме инвертирования.

Напряжения нагрузки с требуемым действующим значением можно получить при различных величинах и фазах зависимого источника напряжения \dot{U}_d . Необходимая величина входного напряжения идеального трансформатора \dot{U}_1 показана на рис. 3 пунктирной окружностью 1. При заданной максимальной величине напряжения преобразователя (показана на рис. 3 окружностью 2) можно выбрать любой режим работы трансформатора, при котором геометрическим местом концов векторов \dot{U}_1 является часть окружности 1, находящаяся внутри области, ограниченной окружностью 2. Вариант, показанный на рис. 3а, обеспечивает наибольшую величину компенсации реактивной мощности активным преобразователем 11.

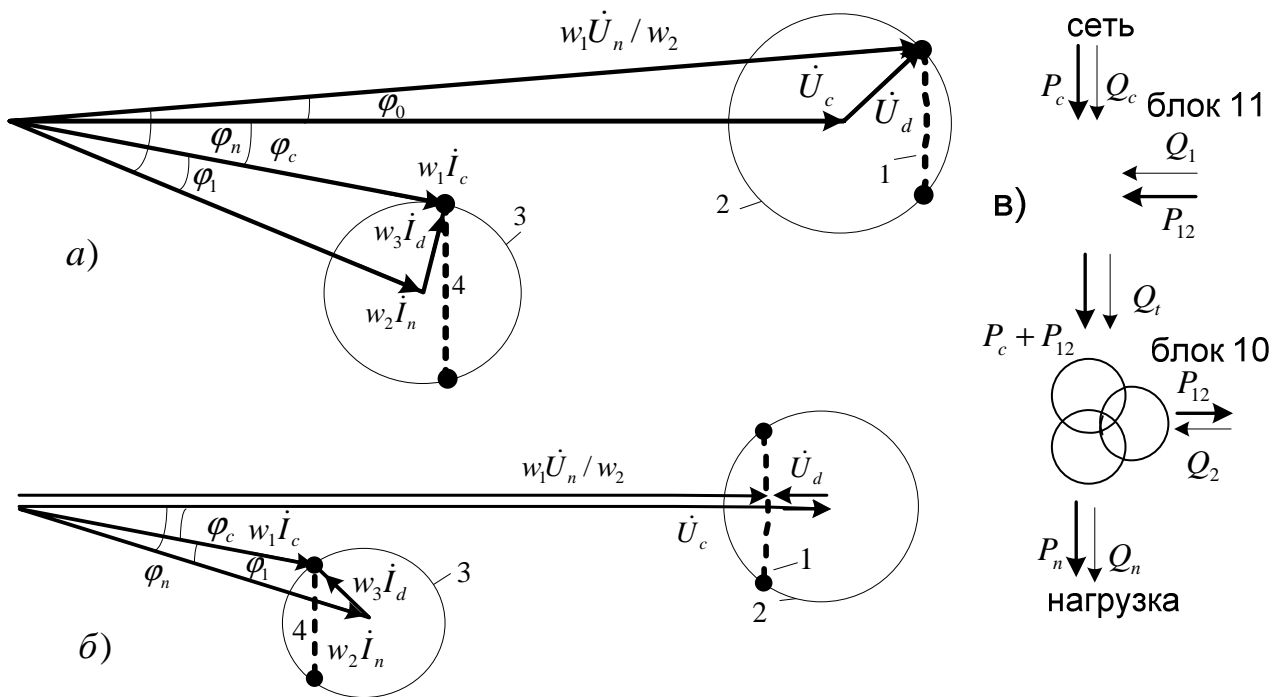


Рис. 3. Векторные диаграммы трансформатора при увеличении (а) и при уменьшении (б) напряжения нагрузки. Энергетическая диаграмма для трансформатора (в).

Величина и направление тока независимого источника \dot{I}_d также могут быть выбраны неоднозначно. Выбор определяется выполнением баланса активных мощностей преобразователей 10 и 11 (пунктирная прямая на рис. 3) и максимально допустимой величиной тока преобразовательного блока 10 (окружность 3 на рис. 3). В этом случае геометрическим местом концов векторов $w_1 \dot{I}_c$ является часть пунктирной прямой, ограниченная окружностью 3. Вариант, показанный на рис. 3а, обеспечивает наибольшую величину компенсации реактивной мощности активным преобразователем 10.

В результате совместной работы преобразовательных блоков 10 и 11 было получено необходимое действующее значение напряжения нагрузки и выполнена частичная компенсация реактивной мощности нагрузки.

По векторной диаграмме (рис. 3а) получим математическую модель устройства. Фазу напряжения сети примем равной нулю. Зададим величины: P_n (активная мощность нагрузки), φ_n (сдвиг по фазе между током и напряжением нагрузки), U_n (необходимое значение напряжения на нагрузке), U_c (действующее значение напряжения сети), w_1 , w_2 и w_3 (количество витков обмоток), U_d и I_d (действующие значения напряжения и тока независимых источников). Возьмем величину φ_c в качестве параметра.

Тогда действующие значение тока нагрузки и тока сети

$$I_n = \frac{P_n}{U_n \cos(\varphi_n)}, I_c = \frac{P_n}{U_c \cos(\varphi_c)}. \quad (3)$$

Из треугольника токов по диаграмме получаем

$$\varphi_1 = \arccos\left(\frac{(I_c w_1)^2 + (I_n w_2)^2 - (I_d w_3)^2}{2I_c w_1 I_n w_2}\right). \quad (4)$$

Из треугольника напряжений получаем

$$\varphi_0 = \varphi_n - \varphi_1 - \varphi_c \quad (5)$$

$$U_d^2 = (U_n w_1 / w_2)^2 + U_c^2 - 2U_c (U_n w_1 / w_2) \cos(\varphi_0) \quad (6)$$

Векторная диаграмма (рис. 3а,б) или выражение (6) позволяют рассчитать диапазон регулирования напряжения нагрузки ($U_{n \min}$, $U_{n \max}$) при неизменном значении U_c или диапазон колебаний напряжения сети ($U_{c \min}$, $U_{c \max}$) при стабилизации напряжения нагрузки U_n . Для максимально допустимого действующего значения напряжения источника $U_{d \max}$ диапазон стабилизации напряжения определяется выражениями

$$U_n w_1 / w_2 = U_{d \max} + U_{c \min} \text{ и } U_{c \max} = U_{d \max} + U_n w_1 / w_2. \quad (7)$$

Уравнения (3-6) позволяют получить аналитическое решение для параметра φ_c при заданных значениях $\varphi_0(U_d)$ из (6) и I_d .

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \sqrt{\left(\frac{I_d U_c w_2}{P_n w_1}\right)^2 - \left(1 - \frac{U_c w_2 \cos(\varphi_n - \varphi_0)}{U_n w_1 \cos(\varphi_n)}\right)^2} - \frac{U_c w_2 \sin(\varphi_n - \varphi_0)}{U_n w_1 \cos(\varphi_n)} \quad (8)$$

Выражение (8) определяет допустимый диапазон мощностей нагрузок, в котором можно осуществить регулирование или стабилизацию. Для максимально допустимого действующего значения тока источника $I_{d \max}$ диапазон мощностей определяется из выражений

$$\frac{I_{d \max} w_2}{P_n w_1} = \frac{1}{U_{c \min}} - \frac{w_2 \cos(\varphi_n - \varphi_0)}{U_n w_1 \cos(\varphi_n)} \text{ и } \frac{I_{d \max} w_2}{P_n w_1} = \frac{w_2 \cos(\varphi_n - \varphi_0)}{U_n w_1 \cos(\varphi_n)} - \frac{1}{U_{c \max}} \quad (9)$$

Выражения (3-6) позволяют проанализировать энергетический баланс рассматриваемого устройства. Используя $k_t = w_1 / w_2$, получим активную и реактивную мощности, передаваемые через обмотку высокого напряжения

$$P_t = U_n I_c k_t \cos(\varphi_n - \varphi_1), Q_t = U_n I_c k_t \sin(\varphi_n - \varphi_1). \quad (10)$$

Активная и реактивная мощности, потребляемые из сети

$$P_c = U_c I_c \cos(\varphi_c), Q_c = U_c I_c \sin(\varphi_c). \quad (11)$$

Активная мощность, передаваемая от источника тока к источнику напряжения

$$P_r = P_t - P_c. \quad (12)$$

Реактивная мощность, генерируемая преобразовательными блоками 10 и 11, соответственно

$$Q_{11} = Q_t - Q_c, \quad (13)$$

$$Q_{10} = U_n I_c k_t \sin(\varphi_n) - Q_t. \quad (14)$$

Выражения (12) и (14) характеризуют также загрузку регулировочной обмотки силового трансформатора.

Результаты и их обсуждение

Используя полученную математическую модель, исследуем загрузку по активной и реактивной мощности различных частей рассматриваемого трансформатора в зависимости от изменения напряжения сети. Активная и реактивная мощность нормированы на активную мощность нагрузки P_n , напряжение сети нормировано на номинальное значение. Обозначения зависимостей на рис. 4 соответствуют введенным обозначениям в выражениях (10-14). Максимально допустимые значения управляющих параметров выбраны удовлетворяющими условиям (7) и (9) при равномерной загрузке блоков 10 и 11.

Из рис. 4 следует, что во всем регулировочном диапазоне осуществляется компенсация реактивной мощности. Генерация реактивной мощности блоками 10 и 11 эффективна, поскольку оба блока генерируют емкостную мощность.

Величина реактивной мощности, генерируемой преобразовательными блоками, не всегда должна быть максимальной. Оптимизируя затраты на передачу реактивной мощности и затраты на выработку реактивной мощности преобразовательными блоками можно получить оптимальное значение реактивной мощности, отдаваемой в сеть. Если реактивная мощность нагрузки много больше указанного значения, то описанная выше стратегия выбора величин и фаз тока и напряжения зависимых источников, даст возможность генерировать преобразовательными блоками 10 и 11 максимально возможную реактивную мощность.

Если реактивная мощность нагрузки меньше оптимального для сети значения, то блоки 10 и 11 должны выполнять только задачу регулирования действующего значения напряжения нагрузки. В этом из равенства $\varphi_1 = 0$ в (4) и $\varphi_0 = 0$ в (6) получают амплитуды регулирующих тока I_d и напряжения U_d . Загрузка блоков 10 и 11 реактивной мощностью в таком режиме фактически равна нулю, компенсируется только реактивная мощность силового трансформатора.

В случае, когда реактивная мощность нагрузки сравнима с оптимальным для сети значением, то целесообразно сначала снижать генерацию реактивной мощности блоком 11, оставляя максимальной генерацию реактивной мощности блоком 10 (см. рис. 3б). Амплитуда управляющего напряжения получается из условия $\varphi_0 = 0$ в (6). Амплитуда и фаза

управляющего тока определяется уравнением (4). В этом случае силовой трансформатор будет загружен меньшей реактивной мощностью, что снизит потери в трансформаторе.

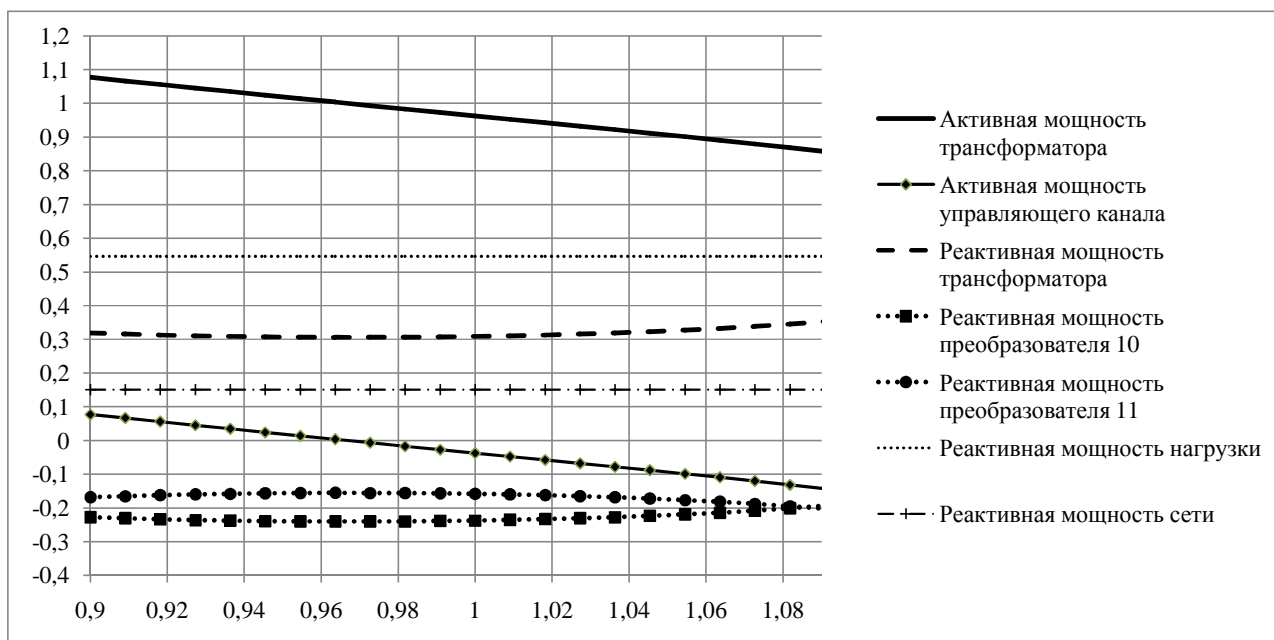


Рис. 4. Зависимости активной и реактивной мощности блоков устройства от напряжения сети

Поскольку границы между указанными областями достаточно условны, то при построении алгоритма управления, целесообразно воспользоваться нечеткой логикой [1]. Этот вопрос требует дальнейшей проработки.

Рассмотренная выше базовая математическая модель трансформатора с векторным управлением позволила только качественно описать его работу. Учет индуктивности рассеяния силового трансформатора можно выполнить следующим образом. Индуктивность рассеяния нагрузочной обмотки можно включить в индуктивное сопротивление эквивалентной нагрузки. Индуктивность рассеяния регулировочной обмотки можно отнести к эквивалентному фильтру. Таким образом, на схеме замещения (рис. 2) добавится только один дополнительный элемент X , включенный последовательно с зависимым источником U_d . Действующее значение напряжения на двух элементах U'_d будет определяться согласно записанным выше уравнениям. Напряжение на зависимом источнике U_d можно получить из баланса мощностей в виде

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Q_1 + xI_c^2}{P_2}\right), U_d = \frac{|P_{12}|}{I_c \cos(\alpha)}. \quad (15)$$

Однако такая модель по-прежнему не позволяет получить количественные результаты для используемых в настоящее время видов трансформаторов и активных преобразователей. Для этого необходима полная математическая модель рассматриваемого устройства, учитывающая потери в трансформаторах, фильтрах и активных преобразователях, а также

моделирование устройства в пакете MATLAB Simulink с целью получения характеристик переходных процессов.

Выводы:

- 1) построена базовая математическая модель трансформатора с векторным управлением;
- 2) на основе математической модели показано, что трансформатор с векторным управлением позволяет осуществлять регулирование напряжения нагрузки и одновременно выполнять компенсацию реактивной мощности;
- 3) выбор оптимальных амплитуд и фаз управляющих тока и напряжения определяется отношением реактивной мощности нагрузки и реактивной мощности, которую целесообразно передать по сети;
- 4) в режиме максимальной загрузки генерация реактивной мощности осуществляется эффективно в каждом из преобразовательных блоков.

Список литературы

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
2. Климаш В.С., Симоненко И.Г. Устройство для стабилизации напряжения трансформаторной подстанции // Патент RU 2159004.
3. Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Липужин И.А. Моделирование энергоэффективных режимов работы цифровой электрической подстанции // Федоровские чтения – 2013. – М. Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 155 – 159.
4. Хохлов Ю.И., Лонзингер П.В., Сафонов В.И. Схемные решения силовых трансформаторов с векторным управлением // Федоровские чтения – 2013. – М. Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 85-87.
5. Чаплыгин Е.Е. Инверторы напряжения и их спектральные модели. – М., Издательство МЭИ, 2003. – 64 с.

Рецензенты:

Ганджа С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» ФГБОУ ВПО Южно-Уральский Государственный Университет (НИУ), г. Челябинск.

Воронин С.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика и электромеханические системы» ФГБОУ ВПО Южно-Уральский Государственный Университет (НИУ), г. Челябинск.