

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОМПЕНСИРОВАННОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТА MatLAB

Фоминцев Л. А., Сизганов Н. В., Зуев К.А.

Научные руководители канд. техн. наук, профессор каф. ЭТКиС ПИ СФУ Попов Ю.П., канд. техн. наук, доцент каф. ЭТКиС ПИ СФУ Сизганова Е.Ю.

Сибирский федеральный университет

Реактивная мощность является параметром режима, характеризующим интенсивность обмена электромагнитной энергией между элементами системы электроснабжения, обусловленного реактивными составляющими токов. Это позволяет выделить источники и потребители реактивной мощности. Для элементов, в которых ток опережает напряжение, реактивная мощность отрицательная, и такие элементы являются источниками реактивной мощности. На электрифицированных железных дорогах переменного тока реактивная мощность передается по контактной сети, рельсовым цепям.

Реактивная мощность, загружая трансформаторы, контактную сеть и другие элементы электрической сети, уменьшает возможность передачи активной мощности, увеличивает потери активной и реактивной мощности и вызывает дополнительные потери напряжения на зажимах потребителя.

На тяговых подстанциях компенсация реактивной мощности осуществляется с помощью однофазных батарей конденсаторов.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показал, что индивидуальную компенсацию можно осуществить, применяя нетрадиционные компенсирующие устройства.

К таким устройствам относится трансформатор, в котором изолированные листы электротехнической стали используются в качестве обкладок конденсатора (компенсированный трансформатор) (рис.1) [1].

Трансформатор содержит обмотку (на чертеже не показано), магнитопровод, набранный из пластин 1 электрической стали, покрытой с двух сторон изоляцией 2, между пластинами помещена тонкая алюминиевая или медная фольга 3. Пластины и фольга

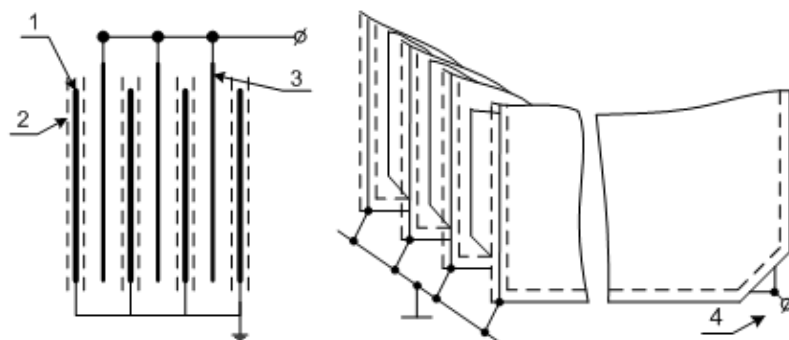


Рис. 1. Трансформатор с однофазным конденсатором.

исполняют роль обкладок конденсатора при подключении их к выводам обмотки трансформатора. Пластины подключают к нулевому проводу и заземляют, а фольгу – к фазным выводам обмотки. Пластины имеют срез угла и набраны в магнитопроводе поочередно срезом в разные стороны, выступающие углы фольги образуют выводы 4, с помощью которых фольгу подключают к обмоткам трансформатора [2, 3]. Для однофазных конструкций выводы фольги соединяют параллельно, а пластины набирают срезом в одну сторону, соединяют и заземляют.

Математическая модель компенсированного трансформатора. Моделирование работы компенсированного трансформатора осуществлялось в системе MatlabSimulink, которая позволяет задавать задачи математической физики с помощью графических блоков и решать эти задачи с высокой точностью.

Для описания процессов, протекающих в трансформаторе, использовались уравнения Максвелла в интегральной форме:

$$\begin{cases} \oint_{l_1} (\vec{E}, d\vec{l}) = -\frac{d}{dt} \int_{S_1} (\vec{B}, d\vec{s}) \\ \oint_{l_2} (\vec{H}, d\vec{l}) = \frac{d}{dt} \int_{S_2} (\vec{D}, d\vec{s}) + \int_{S_2} (\vec{j}, d\vec{s}) \end{cases}$$

где \vec{E} – электрическое поле, \vec{B} – индукция магнитного поля, \vec{H} – магнитное поле, \vec{D} – индукция электрического поля, \vec{j} – плотность электрического тока, l_1 и l_2 – контуры интегрирования, S_1 и S_2 – поверхности, охватываемые контурами.

В левой части уравнения стоит контурный интеграл, в правой части интеграл по поверхности, границей которого является этот контур. Уравнения справедливы для любых контуров. Так как размеры трансформатора значительно меньше длины волны, то излучение электромагнитных волн можно не учитывать $\frac{d}{dt} \int_{S_2} (\vec{D}, d\vec{s}) = 0$

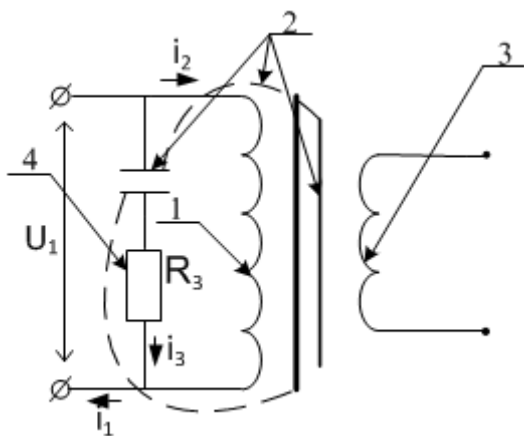


Рис. 2. Схема замещения трансформатора:

1 – обмотка ВН; 2 – магнитопровод-конденсатор, подключенный на часть или полное напряжение обмотки ВН; 3 – обмотки НН; 4 – ограничивающий резистор.

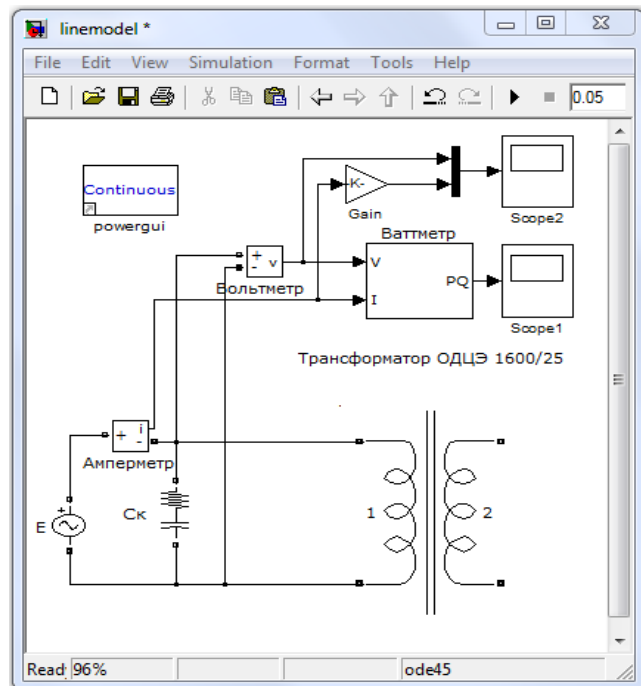


Рис. 3. Модель компенсированного трансформатора в системе MatLAB

Моделирование рабочих процессов в компенсированном трансформаторе проводилось в режиме холостого хода при подключении конденсатора параллельно обмотке высокого напряжения (рис. 2, 3). При этом второе уравнение Кирхгофа в дифференциальной форме будет иметь вид:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_{11} \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_K} \int_0^t i_3 dt + i_3 r_3$$

где u_1, i_1, i_2, i_3 – мгновенное значение напряжения и токов питания, первичной обмотки и конденсатора; r_1, r_3, L_{11} – активное сопротивление обмотки, ограничивающего ре-

зистора и собственные индуктивность обмотки; C_K – емкость конденсатора-трансформатора.

Максимально возможная емкость конденсатора-трансформатора вычисляется исходя из габаритов магнитопровода трансформатора по формуле

$$C_K = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot V}{\delta_{из}(\delta_{л} + 2 \cdot \delta_{из})}$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды, о.е, для принятой изоляции конденсатора-трансформатора «изофлекс» $\varepsilon = 4$; $\delta_{из}$ – толщина изоляции, мм, $\delta_{из} = 0,05$ мм; $\delta_{л}$ – толщина листов магнитопровода, мм, $\delta_{л} = 0,35$ мм; V – объем стали магнитопровода, м^3 , определяется по формуле

$$V = \frac{G}{\gamma},$$

где $G = 742$ – масса магнитопровода, кг; $\gamma = 7650 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали, кг/м^3 .

В результате величина емкости конденсатора для трансформатора ОДЦЭ 1600/25 $C_K = 97,99$ мкФ. Параметры модели (рис. 3) на основе трансформатора ОДЦЭ 1600/25 приведены в таблице 1

Таблица 1

Параметры модели

P_n , кВт	U_1 , кВ	R_3 , Ом	C_K , мкФ
1600	25	450	97,99

Результаты моделирования. Получены зависимости активной и реактивной мощности (рис. 4), потребляемой трансформатором со стороны сети, и напряжения и тока (рис. 5) с учетом компенсации реактивной мощности и без нее.

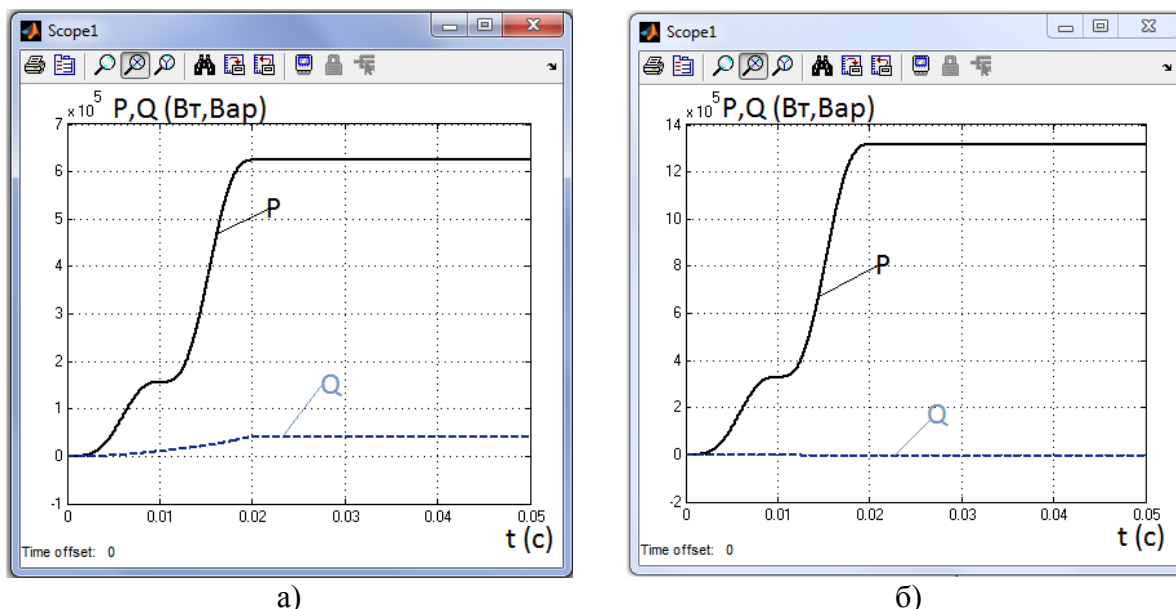
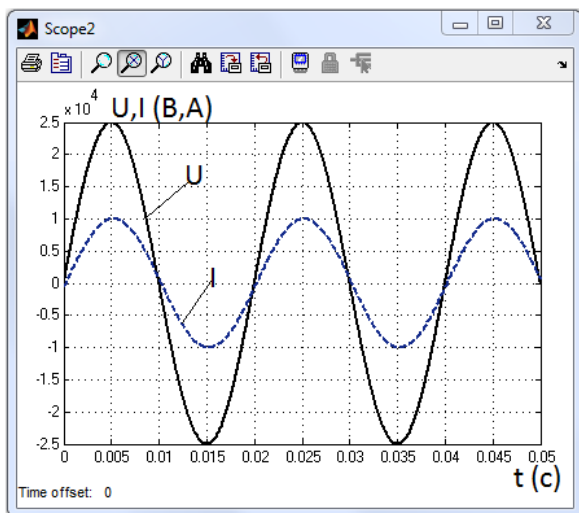
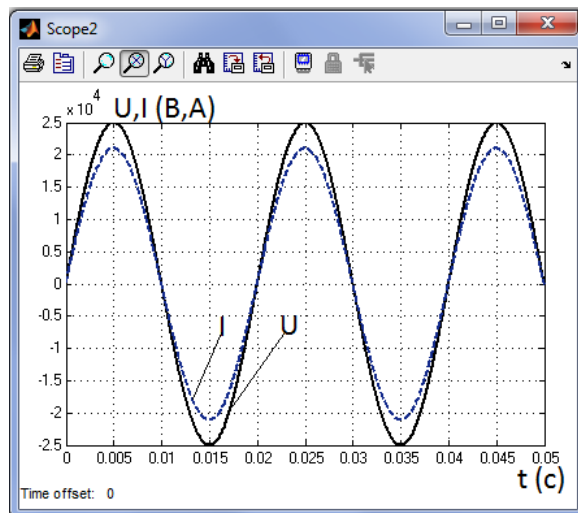


Рис. 3. Зависимость активной и реактивной мощности, потребляемой трансформатором со стороны сети, от времени: а) без компенсации, б) при наличии компенсации

Из рис. 3 видно, что при подключении конденсатора емкостью $C_K = 97,99$ мкФ параллельно обмотке ВН реактивная мощность, потребляемая трансформатором со стороны сети, полностью компенсируется. Первые 0,02 с – итерационный процесс модели.



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы тока (масштаб 200:1) и напряжения:
а) без компенсации, б) при наличии компенсации

Анализ полученных осциллограмм (рис. 4) показал, что увеличивается значение тока i_1 . Это связано с тем, что часть энергии проходит через параллельно подключённый конденсатор с ограничительным резистором. Кроме того, наблюдается изменение фазового сдвига тока в сторону улучшения $\cos(\varphi)$. Для уменьшения тока в цепи конденсатора включён ограничительный резистор, величина сопротивления которого, равная 450 Ом, получена опытным путем. Формализация определения величины сопротивления ограничительного резистора является предметом последующих исследований.

Таким образом, сравнение данных, полученных при имитационном (математическом) моделировании и физическом моделировании на маломощной установке (3 кВт) [4], показывает, что разработанная в MatlabSimulink модель адекватно описывает процессы, происходящие в трансформаторе-компенсаторе, и может быть использована для исследования его работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индивидуальная компенсация реактивной мощности на электрифицированном транспорте/ Ю. П. Попов, Е. Ю. Сизганова, Л. С. Синенко, А. Ю. Южанников // Сб. трудов IV Международной науч. конф. «Эффективность и качество энергоснабжения промышленных предприятий». Украина. Мариуполь. 2000 г. С. 239-240.
2. А. с. 1391369 СССР, Н01F27/24. Трансформатор / А. И. Грюнер, Ю. П. Попов, А. Ю. Южанников и Е. Ю. Лохмакова (СССР) №4080214/24-07; Заявлено 6.10.85; Опублик. 05.05.86, Бюл.№ 11 - 4 с.
3. А. с. 1391369 СССР, Н01F27/24. Трансформатор/ Ю. П. Попов, А. Ю. Южанников (СССР) №4138034/24-07; Заявлено 5.05.85; Опублик. 22.10.86, Бюл.№ 19 - 4 с.
4. Повышение энергетической эффективности систем электроснабжения железных дорог переменного тока с использованием компенсированных трансформаторов/ О. В. Колмаков, В. В. Конратюк, А. И. Орленко, Ю. П. Попов, Л. С. Синенко// Сб. материалов IV конф. «Энергосбережение и ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. 16 ноября 2012. Москва. ЦНТИиБ – филиал ОАО РЖД. С 104-108.