

Д. Е. ДУЛЕПОВ, Е. В. МАСТЮГИНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В УСТАНОВКАХ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АПК
И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Ключевые слова: демпфирующий резистор, конденсаторная установка, коэффициент перенапряжений, переходный процесс, реактивная мощность,

Аннотация. Приведена схема установки поперечной емкостной компенсации. Рассмотрены причины возникновения переходных процессов в тяговой сети переменного тока. Дано описание и алгоритм работы программы для анализа переходных процессов при включении установки поперечной емкостной компенсации в три этапа.

Многие потребители электроэнергии наряду с потреблением активной мощности потребляют и реактивную мощность (РМ). Передача РМ от электростанций к потребителям по электрическим сетям приводит к дополнительным потерям активной мощности. Эти дополнительные потери могут быть уменьшены, если разгрузить сети от передачи реактивной мощности.

Потери в электрических сетях быстро растут с понижением $\cos\varphi$. При $\cos\varphi = 0,5$ они достигают 40 %. Согласно расчетам повышение средневзвешенного $\cos\varphi$ в целом по России на 0,01 позволяет ежегодно экономить около 1 млрд. кВт·ч электроэнергии. Кроме этого такое повышение $\cos\varphi$ позволяет высвободить 150 тыс. кВт мощности генераторов электрических станций.

Наряду с потерями активной мощности, реактивная мощность оказывает большое влияние на устойчивость энергетических систем. Дефицит РМ может привести к крупным авариям на подстанциях в энергосистемах. С помощью источников РМ можно так же улучшать качество электроэнергии у потребителей [5, с. 36]. Именно этими соображениями обусловлена необходимость применения установок компенсации реактивной мощности (КУ) на некоторых предприятиях АПК и предприятиях перерабатывающей промышленности.

При включении установок в цепи будет проходить переходный процесс, во время которого напряжение на конденсаторе и ток через конденсатор могут значительно превосходить свои значения в установившемся режиме более чем на 70–100 %. Такие колебания напряжения на емкостном элементе недопустимы, т. к. это ведет к ускоренному их износу и снижению надежности работы установки в целом [1, с. 28–34].

Коммутационные перенапряжения при включении КУ можно снизить, если при подключении КУ к сети последовательно с конденсатором и реактором включать демпфирующий (балластный) резистор, как показано на рисунке 1.

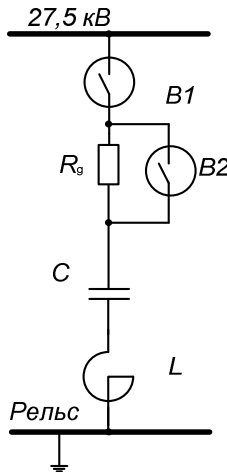


Рисунок 1 – Принципиальная схема КУ

Для определения мгновенных и максимальных значений тока и напряжения на конденсаторе установки поперечной компенсации реактивной мощности при подключении ее к питающей сети разработана программа, которая является расширением интегрированного математического пакета MathCad [3]. Описание и алгоритм работы программы представлены ниже.

$$U := 380$$

$$\psi := \frac{90 \cdot \pi}{180}$$

$$u(t) := \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi)$$

Действующее значение напряжения питающей сети

Перевод начальной фазы питающего напряжения в радианную меру

Мгновенное значение напряжения питающей сети

$$\begin{aligned} C &:= 12 \cdot 10^{-6}; \\ L &:= 0.108; \\ R &:= 45 \end{aligned}$$

Параметры элементов установки (емкость конденсатора, индуктивность реактора) и сопротивление демпфирующего резистора

Вспомогательная функция, задающая время шунтирования пускового резистора

$$\begin{aligned} T &:= 0.057 \\ R(t) &:= \text{if}(t \leq T, r + R, r) \\ U &:= \sqrt{2} \end{aligned}$$

Время шунтирования пускового резистора

$$I_m := \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}}$$

Амплитудное значение установившегося тока, A

$$U_{Cm} := \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I_m$$

Амплитудное значение установившегося напряжения на конденсаторе, В

$$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Вектор начальных условий, x_0 – ток, x_1 – напряжение на конденсаторе

$$D(t, x) := \begin{pmatrix} \frac{u(t) - R(t) \cdot x_0 - x_1}{L} \\ \frac{1}{C} \cdot x_0 \end{pmatrix}$$

Вектор производных

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 0.2, 2000, D)$$

Решение методом Рунге-Кутты

$$n := 0..2000$$

Количество точек на всем диапазоне решения

$$i_n := Z_{n, 1}$$

Полная матрица токов на всем диапазоне решения

$$u_n := Z_{n, 2}$$

Полная матрица напряжения на всем диапазоне решения

$$k := 0..10000 \cdot T$$

Количество точек на первом этапе включения

$$i1_k := Z_{k, 1}$$

$$i2_m := Z_{m, 1}$$

Матрицы напряжений и токов на первом и втором

$$u1_k := Z_{k, 2}$$

$$u2_m := Z_{m, 2}$$

этапах включения КУ

Вспомогательные функции выделения максимальных значений токов и напряжений на первом и втором этапах включения

$$\begin{aligned}
 UCM1k &:= \max(u1) & UCM2k &:= \min(u1) \\
 UCM1 &:= \text{if}(|UCM1k| > |UCM2k|, UCM1k, |UCM2k|) \\
 UCM1m &:= \max(u2) & UCM2m &:= \min(u2) \\
 UCM2 &:= \text{if}(|UCM1m| > |UCM2m|, UCM1m, |UCM2m|) \\
 iCM1k &:= \max(i1) & iCM2k &:= \min(i1) \\
 iCM1 &:= \text{if}(|iCM1k| > |iCM2k|, iCM1k, |iCM2k|) \\
 iCM1m &:= \max(i2) & iCM2m &:= \min(i2) \\
 iCM2 &:= \text{if}(|iCM1m| > |iCM2m|, iCM1m, |iCM2m|)
 \end{aligned}$$

Расчет кратности тока и напряжения на первом и втором этапах включения

$$\begin{aligned}
 ku1 &:= \frac{UCM1}{UCm} & ki1 &:= \frac{iCM1}{Im} \\
 ku2 &:= \frac{UCM2}{UCm} & ki2 &:= \frac{iCM2}{Im}
 \end{aligned}$$

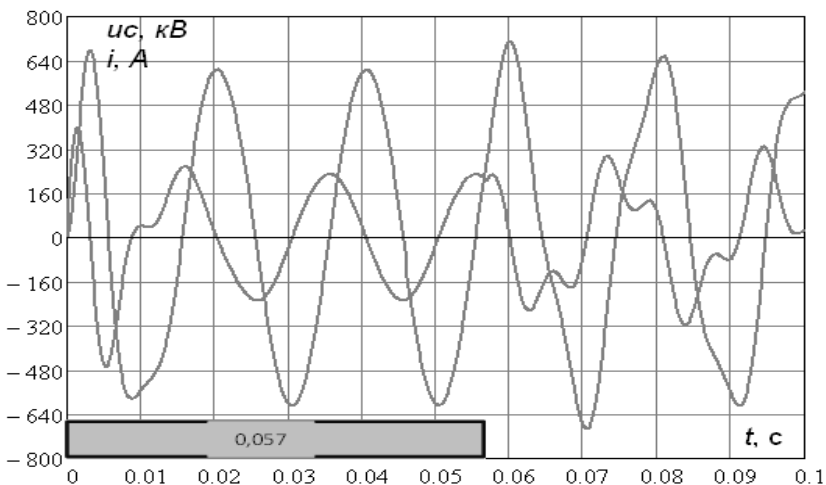


Рисунок 2 – Осциллограмма переходного процесса

Чтобы подключить разработанную программу, необходимо сначала запустить оболочку MathCad и затем предлагаемую программу.

Далее вводятся значения активного сопротивления R в цепи КУ. Далее вводятся параметры КУ: действующее значение питающего напряжения и его начальная фаза, а также емкость батареи конденсаторов и индуктивность реактора [2 с. 47–53].

Время T переключения задается с помощью функции условного перехода `if`. Далее задается вектор x начальных условий и вектор $D(t,x)$ первых производных искомых величин – тока (компьютерная переменная x_0) и напряжения (компьютерная переменная x_1).

Для решения системы дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши численным методом Рунге – Кутта четвертого порядка использована функция `rkfixed`, интегрирующая дифференциальные уравнения с постоянным шагом [4, с. 47]. В скобках функции перечисляются через запятую: вектор начальных условий, начальная и конечная точка интервала интегрирования, число точек, не считая нулевой точки, и первые производные искомых функций.

Решение получается в виде матрицы Z , содержащей 3 столбца. Первый столбец матрицы соответствует времени, второй – току i , третий – напряжению u_C .

Далее полученная матрица разбивается на шесть матриц – три матрицы тока и три матрицы напряжения по числу ступеней включения КУ. После этого с помощью вспомогательных функций `iCM1`, `iCM2`, а также `UCM1`, `UCM2` находят максимальные значения токов и напряжений в каждом этапе включения КУ для каждой из шести матриц. Затем вычисляют коэффициенты перегрузки по току и по напряжению.

Таким образом, программа позволяет: определить мгновенные и максимальные значения тока и напряжения на конденсаторе установки поперечной компенсации реактивной мощности при подключении ее к питающей сети в три этапа, а также определить коэффициенты перегрузки по току и по напряжению для каждого этапа включения.

С помощью предлагаемой программы можно оптимизировать следующие параметры КУ: значение демпфирующего резистора для второго этапа включения КУ и моменты его шунтирования. Это позволит сделать коэффициенты перегрузки по току и по напряжению минимальными и тем самым увеличить эксплуатационную надежность КУ. Это становится актуальным в связи с тем, что в настоящее время для эффективной работы КУ при резко неравномерных нагрузках их приходится переводить из нерегулируемого режима работы в режим дискретного регулирования, то есть часто включать и отключать. Такой режим работы отрицательно сказывается на надежности КУ. Поэтому требуется оптимизация значений демпфирующих резисторов и моментов их шунтирования.

В результате проведенных исследований с помощью указанной программы можно точно определить значение демпфирующих резисторов и значения перенапряжений при включении КУ в два этапа, а

именно при значении демпфирующего резистора $R_g = 40$ Ом коэффициенты перенапряжения при первой и второй коммутациях будут равны 1,1 и 1,15. Перенапряжения в этом случае не превосходят 10–15 % от номинального значения напряжения на конденсаторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дулепов Д. Е., Серебряков А. С., Герман Л. А. Анализ переходных процессов в дискретно регулируемых установках для компенсации реактивной мощности // Вестник НГИЭИ. 2010. № 1. 2010. С. 28–34.
2. Дулепов Д. Е. Исследование переходных процессов в регулируемых установках емкостной компенсации реактивной мощности // Вестник НГИЭИ. 2010. № 6. С. 47–53.
3. Свидетельство Роспатента РФ № 2013612295 от 21.02.2013 о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ программы KUPER-1. Серебряков А. С., Дулепов Д. Е., Семенов Д. А.
4. Серебряков А. С., Шумейко В. В. MATHCAD и решение задач электротехники. Уч. пособие. / М.: Маршрут 2005. 240 с.
5. Юртаев С. Н. Повышение эффективности средств компенсации реактивной мощности на предприятиях со специфическими приемниками: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03: Защищена 25. 05. 2012 г.

**STUDIES OF TRANSIENT IN COMPENSATION PLANTS
OF REACTIVE POWER ON AGRICULTURAL
ENTERPRISES AND ENTERPRISES
OF REPROCESSING INDUSTRY**

***Keywords:** reactive power, condensation plant, transient process, damping resistor, overvoltage factor.*

***Annotation.** The article shows the scheme of plant of cross capacitive compensation. It describes the causes of rise of transient processes of draught net of alternating current. It gives the description of the algorithm of work of the program for the analysis of transient processes while switching on the plant of cross capacitive compensation in three stages.*

ДУЛЕПОВ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – старший преподаватель кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВПО «Нижегородский государственный инженерно-экономический институт», Россия, Княгинино, (dulepov.86@mail.ru).

DULEPOV DMITRY EVGENYEVICH – senior lecturer of the chair «Electrification and Automation», Russia, Knayginino, (dulepov.86@mail.ru).

МАСТИУГИНА ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА – студентка 5 курса, факультета Информационные технологии и системы связи ГБОУ ВПО «Нижегородский государственный инженерно-экономический институт», Россия, Княгинино (mastygina-lenochca@mail.ru).

MASTYUGINA ELENA VIKTOROVNA – 5 th year student, faculty of Information Technology and Telecommunications «Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute», Russia, Knayginino (mastygina-lenochca@mail.ru).
