

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.3.083.72

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-66-72>

Конденсаторная установка для сельской распределительной сети 0,4 кВ: особенности построения

В.В. Тропин¹, Р.Е. Кучеренко²^{1,2} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; г. Краснодар, Россия¹ tropin.v09@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-5966-9328>² r-kucherenko.98@mail.ru

Аннотация. Компенсация реактивной мощности на базе конденсаторной установки, подключенной к сельской распределительной сети 0,4 кВ, при использовании неспециализированных контакторов сопровождается возникновением больших пусковых токов конденсаторов. К тому же установка проводниковой связи с трансформаторами тока нагрузки требует конструктивной доработки конденсаторной установки. С целью устранения указанных недостатков предлагается использовать батарею конденсаторов, управляемую реле времени и защищаемую от пусковых токов тремя *RL*-контурными. «Включение-отключение» батареи конденсаторов при этом должно производиться внутренним сигналом конденсаторной установки, задающим временной интервал «Включено-выключено». С помощью математической модели, а также трехфазной физической модели мощностью 1,2 кВар изучалось поведение переходных и установившихся токов при различных значениях параметров *RL*-контуров. Исходными неизменными параметрами модели являлись реактивные сопротивления конденсаторов и катушек индуктивности. Номинальная величина тока фазы батареи конденсаторов составляла 2,14 А. Переменными параметрами были величины активных сопротивлений *RL*-контуров, принимавших значения 0, 10, 20, 30 и ∞. Изучалась осциллограмма стационарного и переходного тока. В результате установлено, с целью соответствия батареи конденсаторов критерию использования автоматических выключателей и контакторов сети 0,4 кВ, что величина сопротивления резистора *RL*-контура каждой фазы трехфазной батареи конденсаторов должна десятикратно превышать реактивное сопротивление токоограничивающей катушки *RL*-контура и быть в 5 раз меньше величины реактивного сопротивления силового конденсатора фазы батареи конденсаторов. В сельских электрических сетях 0,4 кВ для компенсации реактивной мощности можно установить одиночную конденсаторную установку мощностью 25 кВар с простым автономным управлением. Несколько конденсаторных установок могут компенсировать реактивные нагрузки 50 и 75 кВар.

Ключевые слова: конденсаторная установка, контактор, резистор, реле времени, осциллограмма, батареи конденсаторов, *RL*-контур

Для цитирования: Тропин В.В., Кучеренко Р.Е. Конденсаторная установка для сельской распределительной сети 0,4 кВ: особенности построения // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 66-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-66-72>

ORIGINAL ARTICLE

Condenser installation for a rural distribution network of 0.4 kV: construction features

V.V. Tropin¹, R.E. Kucherenko²^{1,2} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Krasnodar, Russia¹ tropin.v09@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5966-9328>² r-kucherenko.98@mail.ru

Abstract. Reactive power compensation based on a capacitor plant connected to a rural 0.4 kV distribution network, when using non-specialized contactors, is accompanied by the occurrence of large starting currents of capacitors. In addition, the installation of a conductor connection with load current transformers requires structural modification of the capacitor plant. In order to eliminate these disadvantages, it is proposed to use a capacitor bank controlled by a time relay and protected from inrush currents by three *RL* circuits. In this case, the “on-off” mode of the capacitor bank must be switched to by an internal signal of the capacitor bank setting the time interval “on-off”. Using a mathematical model, as well as a three-phase physical model with a power of 1.2 kVAr, the authors studied the behavior of transient and steady-state currents at various values of the parameters of *RL* circuits.

The initial invariant parameters of the model were the reactive resistances of capacitors and inductors. The nominal value of the phase current of the capacitor bank was 2.14 A. The variable parameters were the values of the active resistances of the RL circuits, which took the values of 0, 10, 20, 30 and ∞ . The oscillogram of stationary and transient current was studied. As a result, it was found that in order to match the capacitor bank to the criterion of using circuit breakers and contactors of the 0.4 kV network, the resistance value of the RL circuit resistor of each phase of a three-phase capacitor bank should be tenfold higher than the reactance of the current-limiting coil of the RL circuit and be five times less than the reactance value of the power capacitor of the capacitor bank phase. In rural 0.4 kV electric networks, a single 25 kV capacitor plant with simple autonomous control can be installed to compensate for reactive power. Several capacitor plants can compensate for reactive loads of 50 and 75 kVAr.

Keywords: capacitor bank, contactor, resistor, time relay, oscilloscope, capacitor banks, RL circuit

For citation: Tropin V.V., Kucherenko R.E. Condenser installation for a rural distribution network of 0.4 kV: construction features. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):66-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-66-72>

Введение

Конденсаторные установки (КУ), используемые для компенсации реактивной мощности [1] в сельских распределительных сетях 0,4 кВ, приносят в эксплуатацию сети определенные проблемы, значительно снижающие эффективность их применения [2-4]. Одной из проблем являются пусковые (переходные) токи большой величины, на порядок и более превышающей номинальное значение. Эта проблема не снимается даже при наличии контакторов, специально предназначенных для подключения батареи конденсаторов (БК) к сети [5, 6] с помощью вводимых на определенное время (порядка 0,5 мс) пусковых резисторов, одномоментно подзаряжающих конденсаторы, по причине возможных больших пусковых токов при возникновении случайных импульсов напряжения в самой сети и при подключении к данному узлу сети других КУ или их секций. Второй проблемой с позиции общей эффективности КУ и работоспособности контура регулирования является усложнение монтажа и эксплуатации регулятора. Необходимо специальными проводниками связать входные датчики тока и напряжения регулятора с измерительными трансформаторами тока и напряжения сети, установленными в удаленных, неудобных для монтажа точках. Длинная проводниковая линия значительно ухудшает работоспособность регулятора [7, 8] ввиду снижения помехоустойчивости и наличия сложных разъемных соединений [9].

Отметим, что стандарт ГОСТ Р 56744-2015¹, формулирующий требования к низковольтным КУ для повышения коэффициента мощности, не учитывает особенности расчета, наладки, монтажа и эксплуатации КУ в современных сельских распределительных сетях, имеющих значительную долю нелинейной нагрузки. Некоторые понятия не имеют пояснений

¹ ГОСТ Р 56744-2015 (МЭК 61921:2003). Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные низковольтные для повышения коэффициента мощности. М.: Стандартинформ, 2016. С. 14.

в стандарте. Например, если регуляторы подразделяются на встроенные и автономные, то возникает вопрос о том, что означает автономность. Если под автономностью регулятора понимать отсутствие соединения с трансформаторами тока сети, то автономным регулятором можно считать простое реле календарного времени. И такие упрощенные схемы регуляторов находят применение в распределительных сетях 0,4 кВ.

Повысить работоспособность КУ в сельских распределительных сетях 0,4 кВ с предсказуемым графиком нагрузок электроприемников (например, электроприемники птицеводческих предприятий) несмотря на предложения по использованию тиристоров для управления током БК, по нашему мнению, может подойти кардинально упрощающий систему управления (рис. 1).

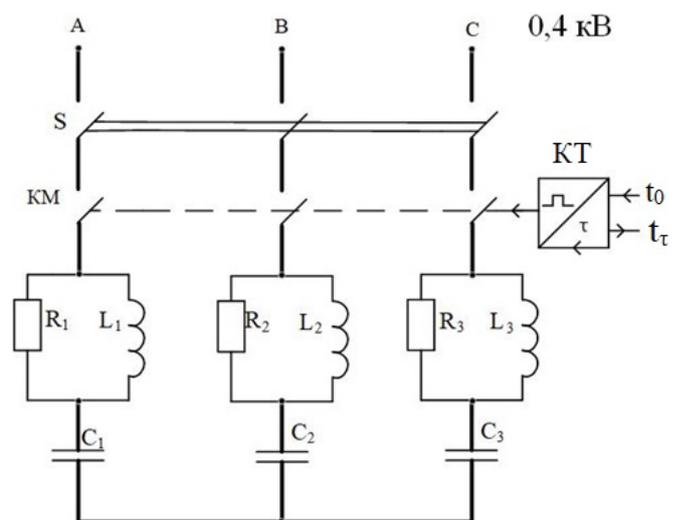


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема батареи конденсаторов (C_1, C_2, C_3), управляемой реле времени (КТ) и защищаемой от пусковых токов тремя RL -контурами

Fig.1. Schematic diagram of a capacitor bank (C_1, C_2, C_3) controlled by a time relay (KT) and protected from inrush currents by three RL circuits

В электрической схеме (рис. 1) реле времени KT задает интервал от момента t_0 начала включения контактов контактора KM до их отключения t_r . Временной интервал $t_r - t_0$, равный τ , формируется эксплуатационным персоналом после анализа графика реактивной нагрузки сети.

Цель исследований: разработать математическую и физическую модели процесса формирования пускового тока БК и с их помощью исследовать динамические характеристики БК с RL -контуром, включенным в каждую фазу БК, для выявления влияния величины активного сопротивления R .

Материалы и методы

Для снижения пускового тока предложено ввести RL -контур в каждую фазу БК (рис. 1). Действие резистора направлено на создание пускового зарядного тока в момент включения. Подъемом напряжения конденсатор подготавливается к взаимодействию с катушкой индуктивности с целью уменьшения ее переходного тока на начальном этапе переходного процесса. Одновременно резистор демпфирует собственные резонансные колебания RLC -цепи с сетью, чтобы не вызывать дополнительных высших гармоник, аналогичных высшим гармоникам, вызванным нелинейными электроприемниками.

Для определения необходимых параметров демпфирующего RL -контура (рис. 1), обеспечивающего заданное соотношение величин пускового и номинального токов БК, выполнено математическое и физическое моделирование переходного процесса, при котором анализировались величины свободных токов i_1, i_2, i_3 (конденсатора емкостью C , катушки индуктивности L , резистора с сопротивлением R). Схема соответствующей математической модели представлена на рисунке 2.

Уравнения, связывающие между собой токи конденсатора C , катушки индуктивности L и резистора

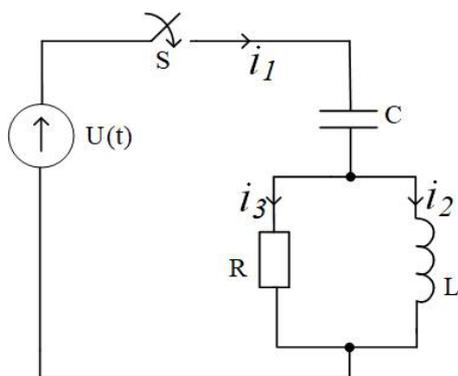


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема математической модели фазы батареи конденсаторов
Fig. 2. Schematic diagram of the mathematical model of the capacitor bank phase

R токоограничивающего контура с воздействующей ЭДС $U(t)$, представлены формулами:

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt + L \frac{di_2}{dt} = U(t); \quad L \frac{di_2}{dt} = Ri_3; \quad i_1 = i_2 + i_3,$$

где i_1, i_2, i_3 – величины токов конденсатора, катушки, резистора (А) соответственно; C, L, R, U – величины емкости (мкФ), индуктивности (мГн), сопротивления (Ом), напряжения (В) соответственно.

Для анализа величины и формы пускового тока i_1 в цепи с выключателем S определена его свободная составляющая, но для упрощения предварительно определена величина тока i_2 , поскольку его временная функция содержит только одну ортогональную составляющую – синусную. Однородное дифференциальное уравнение для тока i_2 имеет вид:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{di}{dt} + \frac{1}{CL} i = 0,$$

корни его характеристического уравнения $p_{1,2} = -\frac{1}{2\tau} \pm \sqrt{\frac{1}{4\tau^2} - \frac{1}{LC}}$, где постоянная времени $\tau = RC$.

Величина частоты резонанса RLC -контура (ω_0) определяется выражением:

$$\omega_0 = \omega \sqrt{\frac{X_C}{X_L} \sqrt{1 - \frac{X_C X_L}{4R^2}}}, \tag{1}$$

где ω – угловая частота напряжения сети, равная $2\pi f$, а $f = 50$ Гц.

Отметим, что система «Сеть-БК» демпфируется, если $R^2 = (X_C X_L / 4)$.

Временная функция свободной составляющей тока i_2 имеет вид:

$$i_2(t) = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \cdot \frac{U(0)}{X_L} e^{-t/(2\tau)} \sin \omega_0 t, \tag{2}$$

где $U(0)$ – напряжение источника в момент коммутации ключа S .

При стремлении R к бесконечности формула (2) дает известное значение величины амплитуды пускового тока БК, ограничиваемого катушкой индуктивности в каждой фазе $I_{2\text{пуск}} = I_{1\text{пуск}} = U(0) / (\sqrt{X_L X_C})$.

Ток i_3 в цепи резистора R найден из уравнения $i_3 = \frac{L}{R} \frac{di_2}{dt}$ и суммированием токов i_3 и i_2 .

Свободная составляющая искомого тока конденсатора (i_1):

$$i_1(t) = \left(\frac{U(0)}{R}\right) e^{-t/(2\tau)} \left[\cos \omega_0 t + \left(\frac{R}{X_L}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \left(1 - \frac{X_L X_C}{2R^2}\right) \sin \omega_0 t \right]. \tag{3}$$

Формула (3) дает оценку величин амплитуд и характерных изменений тока коммутации БК по трем составляющим: экспоненциальной,

синусной, косинусной, и если величина амплитуды косинусной составляющей зависит только от сопротивления R резистора, то величина синусной составляющей зависит от соотношения всех параметров, в частности, может быть даже равна нулю, если $2R^2 = X_L X_C$.

Проведено сравнение теоретических расчетов с результатами физического моделирования на базе трехфазной БК мощностью 1,2 квар, защищенной от переходного пикового тока в каждой фазе RL -контуром. Принципиальная электрическая схема физической модели представлена на рисунке 3. Исходными неизменными параметрами модели являются реактивные сопротивления конденсаторов (C_1, C_2, C_3) $X_C = 103,0$ Ом (погрешность $\pm 1,0\%$) и катушек индуктивности (L_1, L_2, L_3) $X_L = 2,1$ Ом (погрешность $\pm 2\%$). Номинальная величина тока фазы БК составляет 2,14 А.

Переменными параметрами являются величины активных сопротивлений RL -контуров. При $R = 0$ и подключении конденсаторов БК непосредственно к сети через выключатель S пиковая величина фазного тока i_f составила 115 А. Длительность импульса коммутации при этом имеет величину порядка 0,2 мс.

Величина установившегося тока 2,24 А больше номинального значения, что обусловлено значительной величиной токов высших гармоник (рис. 4).

При установке RL -контюра с сопротивлением резистора 20 Ом ток i_f очищается от высших гармоник (рис. 5). Ярко выделена только одна гармоника

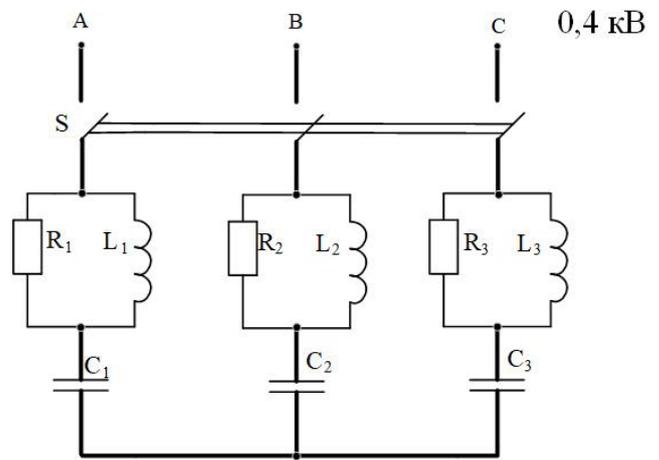


Рис. 3. Принципиальная схема физической модели на базе трехфазной батареи конденсаторов

Fig. 3. Schematic diagram of a physical model based on a three-phase capacitor bank

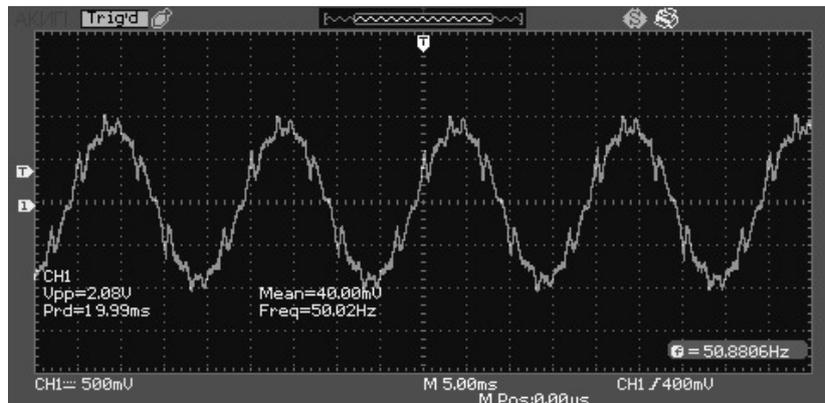


Рис. 4. Осциллограмма стационарного тока i_f фазы А батареи конденсаторов без RL -контюра

Fig. 4. Oscillogram of the stationary current i_f of phase A of a capacitor bank without a RL circuit

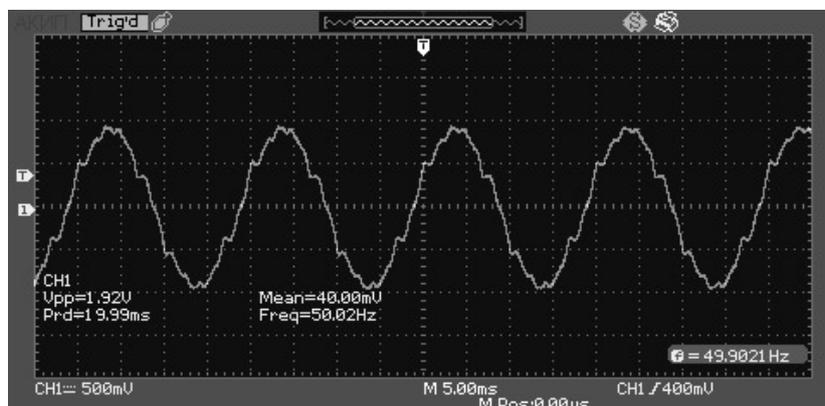


Рис. 5. Осциллограмма стационарного тока i_f с RL -контуром при $R = 20$ Ом

Fig. 5. Oscillogram of stationary current i_f with an RL circuit at $R = 20$ ohms

сети – частотой 350 Гц, поскольку собственная частота RLC -контура согласно (1) составляет величину 330 Гц, близкую величине седьмой гармоники.

При этих же параметрах и воздействии входного сетевого напряжения пиковым значением 290 В в переходном процессе амплитудное значение тока составило 14,5 А, а через 3 мс переходной процесс закончился и установился принужденный режим работы с номинальным током величиной 2,14 А (рис. 6). Это указывает на вполне достаточную для практики использования БК величину соотношения пикового и номинального токов, равную 7, поскольку именно в этом случае можно использовать и автоматический выключатель, и контактор, рассчитанные на номинальный ток БК. Отметим, что при соотношении 10:1 активного и реактивного сопротивлений RL -контура дополнительные потери будут незначительными (0,7% от полной мощности БК).

При установке сопротивления резистора RL -контуров величиной 10 Ом ток коммутации i_1 меняет форму (рис. 7). Величина сопротивления 10 Ом близка к критическому значению 7 Ом, определенному по формуле (1) для данной БК. Поэтому колебательный процесс в токе практически отсутствует:

косинусная свободная составляющая тока сильно подавляется экспоненциальной составляющей согласно формуле (3), а синусная ортогональная составляющая обращается в нуль согласно условию для коэффициента (множителя перед синусом тока).

При воздействующем напряжении 120 В в момент $t = 0$ пиковое значение тока составляет 12,1 А, а при максимальной величине входного напряжения 300 В равно 29 А, что в 14 раз превышает номинальный ток БК, поэтому пятикратное превышение сопротивления демпфирующего резистора над реактивным сопротивлением катушки индуктивности не может быть рекомендовано для практики. Отметим, что электротехнической фирмой «Нокиа» используется именно такое пятикратное соотношение для реализации широкополосных силовых фильтров 11 гармоники.

Для случая $R = 30$ Ом свободный переходной ток, или ток коммутации i_1 , определяемый формулой (3), по сравнению с током, полученным при $R = 20$ Ом, имеет меньшее пиковое значение за счет меньшей косинусной составляющей тока, но среднее значение тока остается почти прежним ввиду увеличения времени переходного процесса до 10 мс вместо 3 мс (рис. 8).

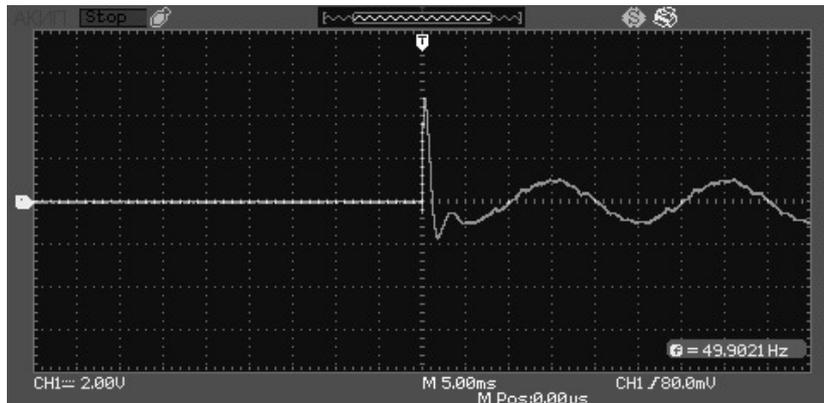


Рис. 6. Осциллограмма переходного процесса для тока i_1 фазы А батареи конденсаторов при $R = 20$ Ом
 Fig. 6. Oscillogram of the transient process for the current i_1 of phase A of the capacitor bank at $R = 20$ ohms

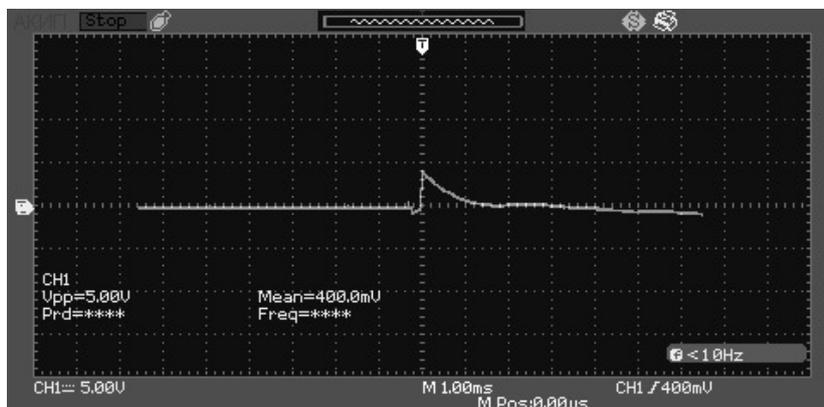


Рис. 7. Осциллограмма переходного тока i_1 фазы А батареи конденсаторов при $R = 10$ Ом
 Fig. 7. Oscillogram of the transient current i_1 of phase A of the capacitor bank at $R = 10$ ohms

При $R = \infty$ график тока переходного процесса после коммутации i_t представлен на осциллограмме рисунка 9. Амплитудное значение тока I_A величиной 17,3 А определяется формулой $I_{2\text{пуск}} = U(0) / (\sqrt{X_L X_C})^1$. Переходной процесс длительностью 20 мс имеет колебательный характер с частотой резонанса, соответствующей расчетному значению по формуле (1). Такой ток переменного характера с амплитудными величинами, значительно превышающими номинальное, также является нежелательным в практике использования конденсаторов

БК, поскольку вызывает дополнительные высокочастотные тепловые воздействия на изоляцию, приводящие к недопустимым превышениям величины выделенной энергии. Частично эта энергия поглощается резисторами RL -контуров, причем рассеиваемая в них активная мощность не должна превышать общепринятый критерий 0,5% от полной мощности БК. Этому критерию соответствует десятикратное увеличение реактивного сопротивления катушки RL -контура. Анализ показал, что указанное соотношение является наиболее рациональным.

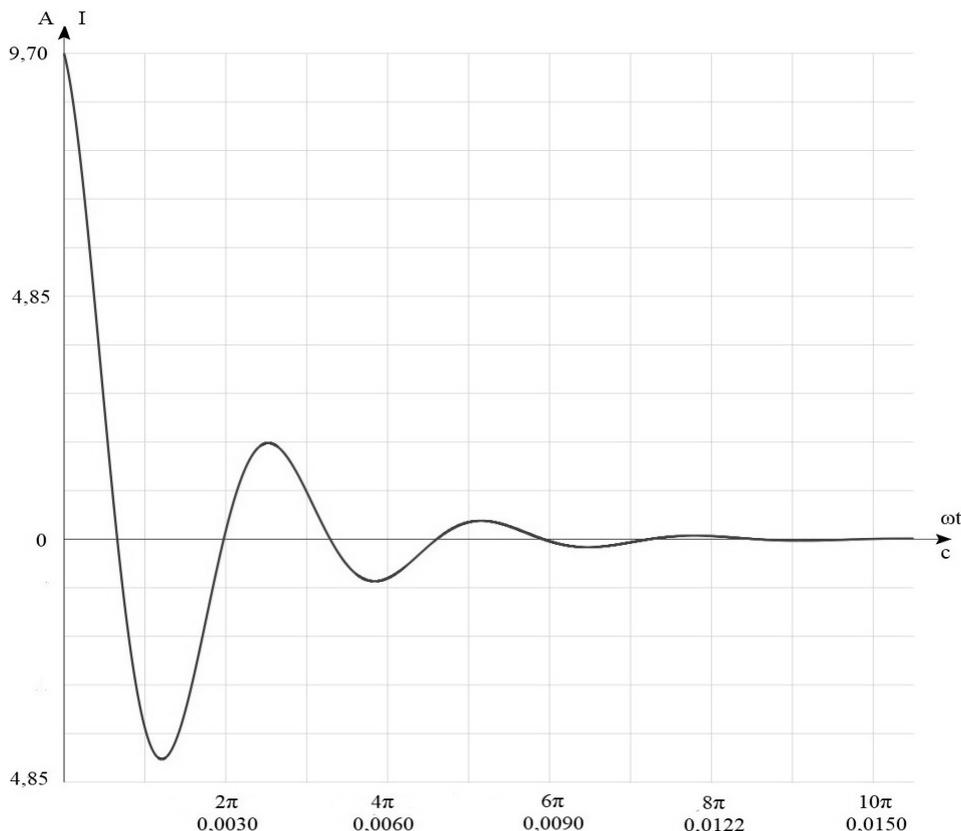


Рис. 8. Переходной ток i_t , фазы А батареи конденсаторов при $R = 30$ Ом
 Fig. 8. Transient current i_t , of phase A of the capacitor bank at $R = 30$ ohms

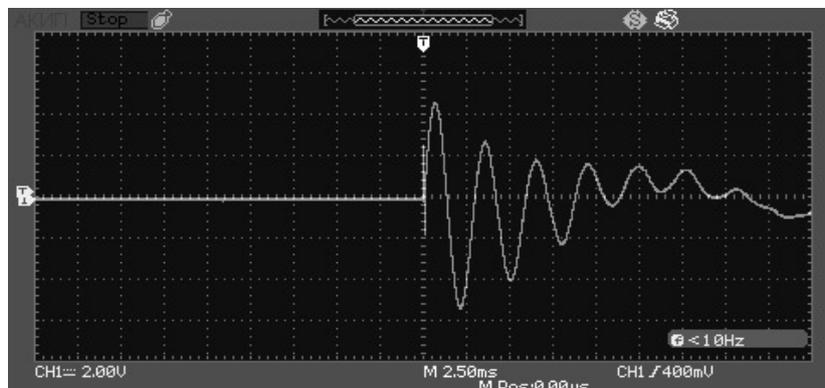


Рис. 9. Переходной ток i_t , фазы А батареи конденсаторов при отсутствии резисторов
 Fig. 9. Transient current i_t , of phase A of the capacitor bank without any resistors

¹ Королёв Ю.П. О надёжности электроснабжения сельских потребителей // Техника в сельском хозяйстве. 2000, №6. С. 33,34.

Выводы

1. Для соответствия критерию использования автоматических выключателей и контакторов сети 0,4 кВ для БК величина сопротивления резистора RL -контура каждой фазы трехфазной БК должна быть в 10 раз больше реактивного сопротивления токоограничивающей катушки RL -контура и в 5 раз меньше величины реактивного сопротивления силового конденсатора фазы БК.

Список источников

1. Кондратюк М.И. Компенсация реактивной мощности в сетях 0,4 кВ // *Моя профессиональная карьера*. 2021. Т. 1, № 20. С. 54-57. EDN: XHZOZR
2. Корепанова О.Ю. Компенсация реактивной мощности в электросетях АПК и оценка энергосбережения // *Главный энергетик*. 2014. № 2. С. 33-39. EDN: SBXLAV
3. Богдан А.В., Перекопский К.В. Определение мощности одноступенчатой конденсаторной установки // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2007. № 8. С. 30-31. EDN: IAYELH
4. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Брежнев И.В. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24, № 2. С. 72-85. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>
5. Nisja I., Zoni M. Study of capacitor bank switching transient in distribution network. *MATEC Web of Conferences*. 2018;248:02004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824802004>
6. Савиных В.В., Тропин В.В. Условия токовой коммутации при подключении силового конденсатора к электрической сети // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2011. № 1. С. 67-70. EDN: NQSRNR
7. Устройство для компенсации реактивной мощности: а.с. SU1515254 A1, МПК H02J 3/18 / Н.И. Джус; № 4215574; заявл. 27.02.1987; опубл. 15.10.1989, Бюл. № 38. EDN: HOYNBO
8. Устройство для компенсации реактивной мощности: Патент на полезную модель RU222051 U1, МПК H02J 3/18 (2006.01) / В.В. Тропин, Р.Е. Кучеренко, Л.В. Богородицкая; заявл. 19.06.23; опубл. 07.12.2023, Бюл. № 34. EDN: RBMTDT
9. Qiao X., Bian J., Chen C., Li.H. Comparison and analysis of reactive power compensation strategy in power system. 2019 *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Beijing, China, 2019. Pp. 689-692. <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975301>

Информация об авторах

Владимир Валентинович Тропин¹, д-р техн. наук, профессор; tropin.v09@mail.ru

Роман Евгеньевич Кучеренко², аспирант; r-kucherenko.98@mail.ru

^{1,2} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

Вклад авторов

В.В. Тропин – формулирование основной концепции исследования, подготовка текста статьи.

Р.Е. Кучеренко – проведение эксперимента, анализ и дополнение текста статьи.

Статья поступила 10.12.2023, после рецензирования и доработки 27.03.2024; принята к публикации 01.04.2024

2. В сельских электрических сетях 0,4 кВ для компенсации реактивной мощности можно устанавливать одиночные КУ мощностью 25 квар с простым автономным управлением. С учетом возможности КУ настраиваться на работу в определенном графике нагрузки несколько КУ могут компенсировать реактивные нагрузки 50 и 75 квар.

References

1. Kondratyuk M.I. Reactive power compensation in 0.4 kV networks. *My Professional Career*. 2021;1(20):54-57. (In Russ.)
2. Korepanova O.Yu. Compensation of reactive power in electrical grids of agroindustrial complex and estimation of energy saving. *Chief Power Engineer*. 2014;2:33-39. (In Russ.)
3. Bogdan A.V., Perekopsky K.V. Determination of the power of a single-stage capacitor plant. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2007;8:30-31. (In Russ.)
4. Biryulin V.I., Kudelina D.V. Model development for the analysis of reducing voltage asymmetry methods in power supply systems. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022;24(2):72-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>
5. Nisja I., Zoni M. Study of capacitor bank switching transient in distribution network. *MATEC Web of Conferences*. 2018;248:02004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824802004>
6. Savinykh V.V., Tropin V.V. Conditions of current switching when connecting a power capacitor to an electrical network. *Russian Electromechanics*. 2011;1:67-70. (In Russ.)
7. Juice N.I. Device for compensating for reactive power: A.S. SU1515254 A1, IPC H02J 3/18; No. 4215574, 1989. (In Russ.)
8. Tropin V.V., Kucherenko R.E., Bogoroditskaya L.V. Device for reactive power compensation: utility model patent No. 222051 Russian Federation, IPC H02J 3/18 (2006.01), 2023. (In Russ.)
9. Qiao X., Bian J., Chen C., Li.H. Comparison and analysis of reactive power compensation strategy in power system. 2019 *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Beijing, China, 2019, pp. 689-692. <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975301>

Author Information

Vladimir V. Tropin¹, DSc (Eng), Professor; tropin.v09@mail.ru

Roman E. Kucherenko², postgraduate student; r-kucherenko.98@mail.ru

^{1,2} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 13 Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

Author Contribution

V.V. Tropin – conceptualization, writing – original draft preparation and editing

R.E. Kucherenko – investigation (conducting the experiment)

Received 10.12.2023, Revised 27.03.2024, Accepted 01.04.2024