

УДК 621.3.064.35

DOI 10.35211/2500-0586-2025-4-53-32-38

*А. В. Стрижиченко, В. В. Ефимов, В. А. Редькина***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В RLC-КОНТУРЕ
С ЦЕЛЬЮ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ****Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
(филиал), г. Волжский, Россия**

Strizhichenko@vfmei.ru, Vlad999@yandex.ru, v.a.redkina@vfmei.ru

Автор, ответственный за переписку:

Александр Васильевич Стрижиченко, Strizhichenko@vfmei.ru

В настоящее время существует проблема коммутационных перенапряжений и бросков токов в цепи с индуктивно-емкостной нагрузкой, которая приводит к ускоренному износу коммутационного оборудования.

Целью исследования является выявление и оценка коммутационных параметров путем моделирования установившегося и коммутационных режимов электрической цепи с индуктивно-емкостной нагрузкой с целью недопущения уменьшения срока службы оборудования.

Ключевые слова: индуктивная нагрузка, вакуумный контактор, переходный процесс, коммутационный режим, броски тока, коммутационное перенапряжение, конденсаторные батареи

*A. V. Strizhichenko, V. V. Efimov, V. A. Redkina***MODELING OF SWITCHING PARAMETERS IN THE RLC CIRCUIT
OF THE FURNACE IN ORDER TO PRESERVE THE RESOURCE
OF THE SWITCHING EQUIPMENT****National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Volzhskiy, Russia**

Currently, there is a problem of switching overvoltages and surges of currents in circuits with an inductive load, which leads to accelerated wear of switching equipment.

The purpose of the study is to identify and evaluate the switching parameters by modeling the steady-state and switching modes of an electric circuit with an inductive load in order to avoid reducing the service life of the equipment.

Keywords: inductive load, vacuum circuit breaker, transient, switching mode, surges of current, switching over-voltage, capacitor banks

Индукционная печь работает по принципу электромагнитной индукции. При подаче переменного тока на индуктор, состоящий из металлических проводов катушки, образуется переменное магнитное поле. Данное поле способствует возникновению вихревых токов, пронизывающих материал, помещенный внутрь печи. При этом энергия индуктированного переменного электрического поля превращается в тепловую, и объект нагревается. Для выхода в максимальный рабочий режим применяется компенсация реактивной мощности индукционной печи, осуществляемая параллельным включением конденсаторных батарей. В образовавшемся LC-контуре происходит циркуляция реактивной мощности. Так как энергия передается между индуктором и конденсаторами в замкнутом колебательном контуре, значения токов на данных элементах возрастают. Также при этом уменьшается нагрузка сети.

При включении реактивных элементов в цепи, таких как трансформатор или конденсаторные батареи, образуются большие амплитуды бросков тока. Высокие амплитуды приводят к повышенному электродинамическому усилию на токоведущие элементы, которые сокращают ресурс коммутационного оборудования. [1]

В вакуумных контакторах (коммутационный аппарат, предназначенный для включения и отключения силовых электрических цепей дистанционным способом) возникновение среза тока образуется из-за высокой выключающей способности вакуумного контактора.

Срез тока в определенных режимах работы может привести к высоким броскам тока или повышению напряжения на обкладках конденсаторных батарей, что сокращает их срок службы [2].

Схема моделирования укрупненно состоит из трех ветвей, представленных на рис. 1.

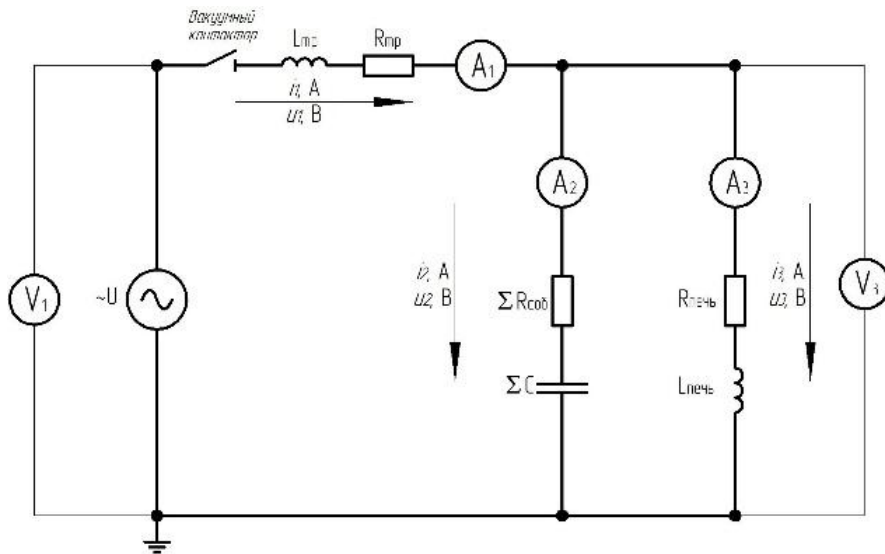


Рис. 1. Приведенная схема RLC контура печи с указанием наименований токов

Неразветвленная ветвь состоит из идеального источника напряжения U , ключа вакуумного контактора и понизительного силового трансформатора, представленного активно-индуктивной нагрузкой $R_{тр}$ и $L_{тр}$. Вторая ветвь характеризуется преимущественно емкостной нагрузкой ΣC , в виде ряда регулируемых и нерегулируемых конденсаторных батарей с собственным

небольшим активным сопротивлением $\Sigma R_{собр}$, вызванным тепловыми потерями в проводах и конденсаторах. Третья ветвь имеет преимущественно активно-индуктивную нагрузку $R_{печь}$ и $L_{печь}$ представленной индуктором (печью). Ветви 2 и 3 создают замкнутый RLC контур. Первичная схема установки представлена на рис. 2.

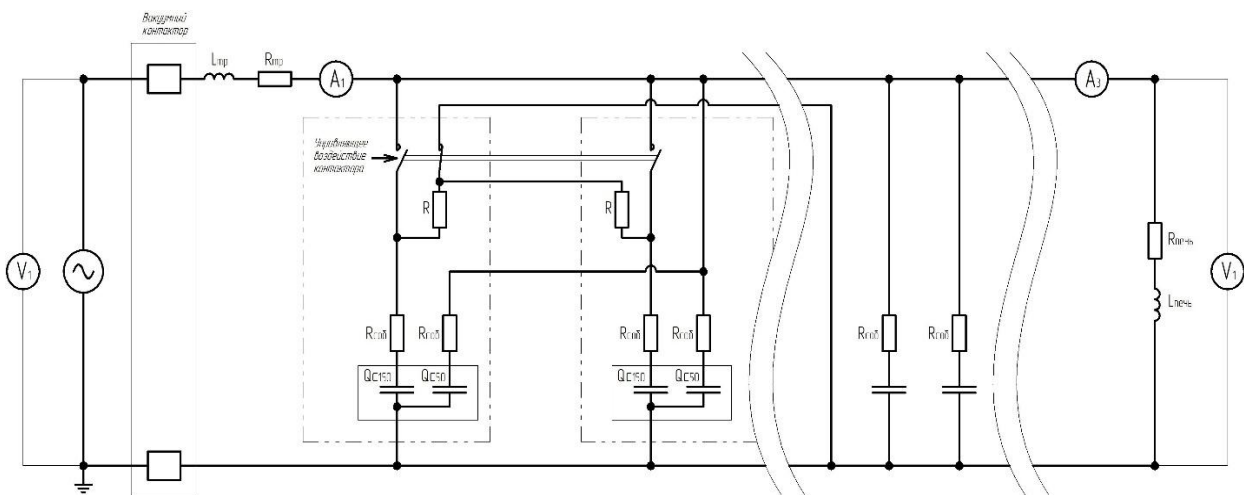


Рис. 2. Первичная схема моделирования индукционной печи

Задача регулирования коммутатора заключается в подборе оптимального количества включенных конденсаторных батарей для снижения тока в неразветвленной цепи.

Результаты моделирования установившегося режима показаны на рис. 3.

На графике представлен установившийся режим печи, на котором параметры неразветв-

ленной ветви составили: амплитудные значения напряжения $u_1 = 770,7$ В, тока $i_1 = 2093$ А. Амплитудное значение тока индуктора составило $i_3 = 7463$ А. Для компенсации реактивной составляющей мощности используются конденсаторные батареи с включенной мощностью, равной 31860 мкФ, амплитудное значение тока через все конденсаторы составило $i_2 = 7319$ А.

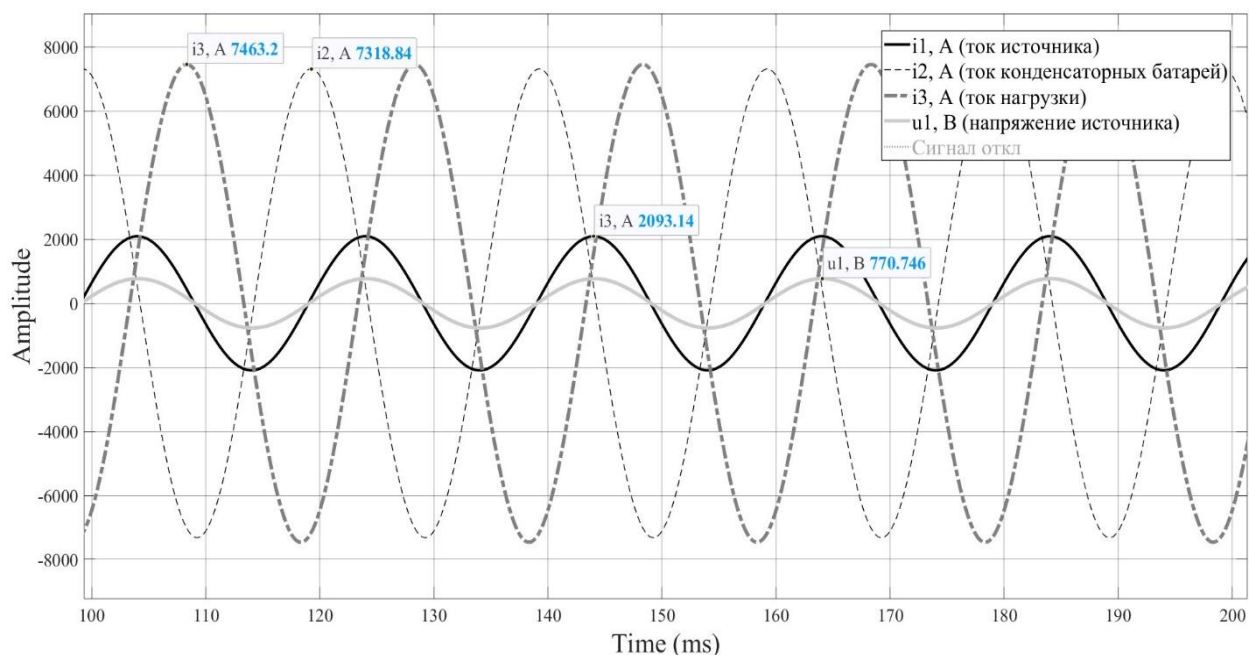


Рис. 3. Результаты моделирования установившегося режима с количеством подключенных батарей $n = 18$

Результаты моделирования переходных процессов при замыкании контактора представлены на рис. 4–6.

На осциллограмме рис. 4 представлен переходный процесс, вызванный включением RLC контура печи с минимальным количеством включенных конденсаторных батарей, в наиболее благоприятный момент времени, соответ-

ствующий переходу напряжения через ноль.

В первый момент времени, соответствующий временному интервалу 10–15 миллисекунд, можно наблюдать наличие среднечастотных колебаний токов в цепях источника и конденсаторной батареи, что, в свою очередь, связано с входом в установившийся режим RLC контура.

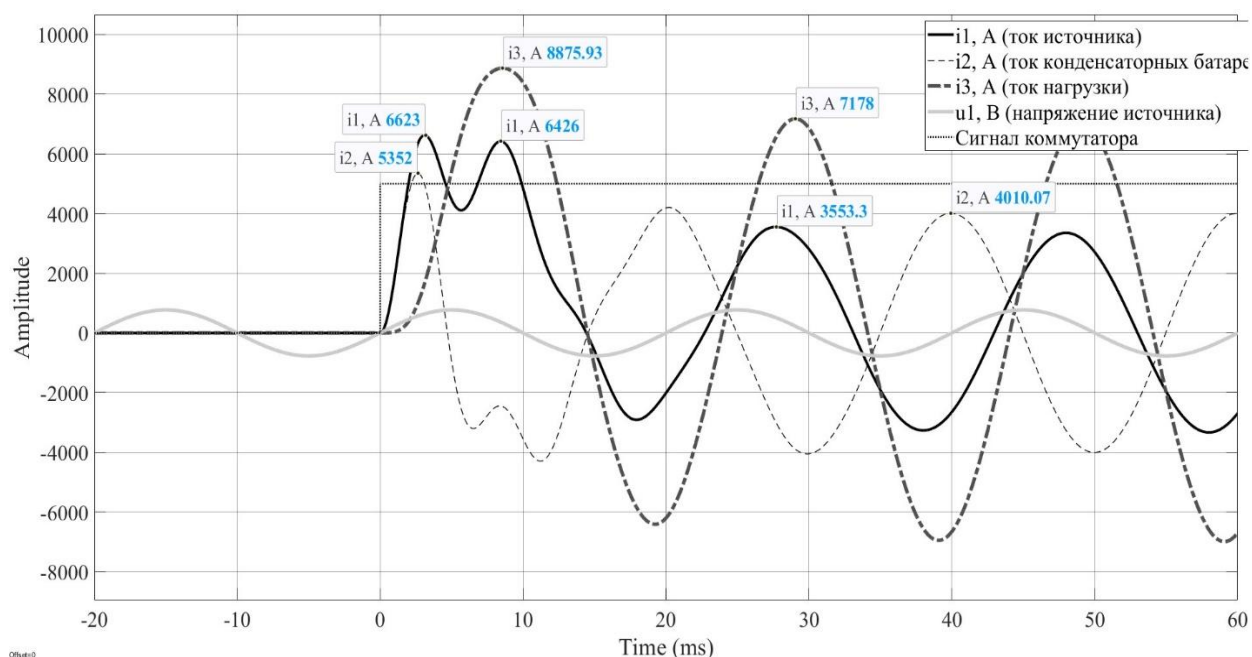


Рис. 4. Осциллограмма включения цепи в наиболее благоприятном режиме включения с минимальным количеством конденсаторных батарей

Осциллограмма токов и напряжений, протекающих через конденсаторную батарею Q_{200} представлена на рис. 5, в момент коммутации у

трехвыводных конденсаторов $Q_{150} + Q_{50}$ обкладка Q_{150} отключена по условию переключения, обкладка Q_{50} находится в работе.

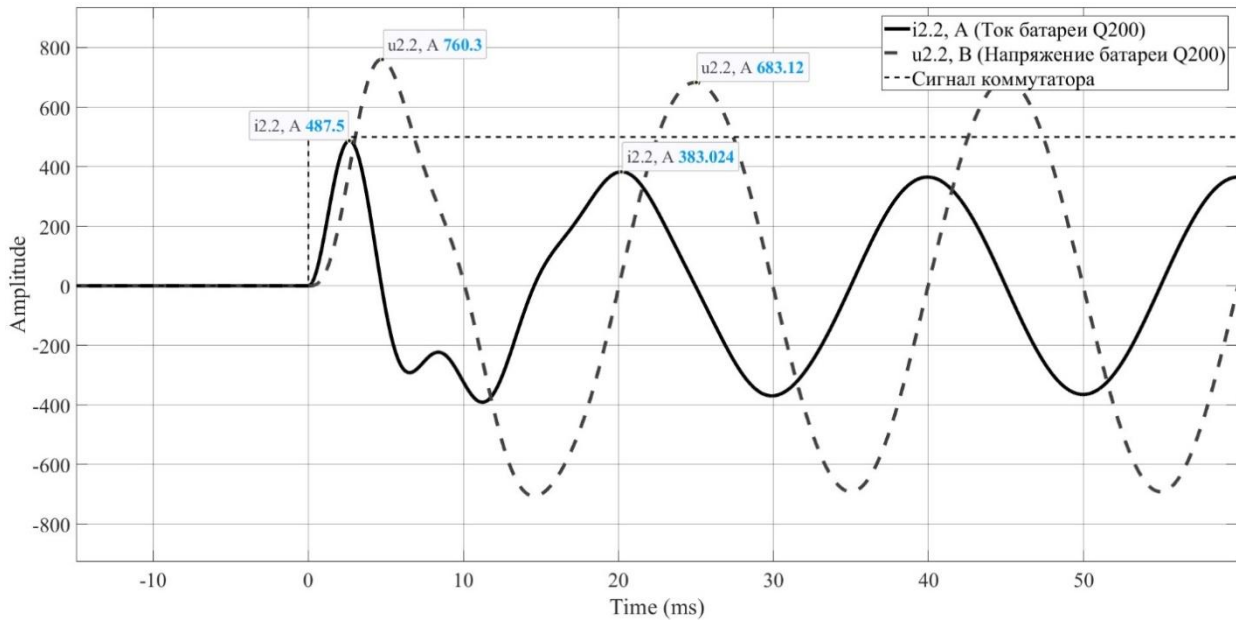


Рис. 5. Осциллограмма токов и напряжений, протекающих через конденсаторную батарею Q_{200} при включении цепи в наиболее благоприятном режиме включения с минимальным количеством конденсаторных батарей

Исходя из анализа осциллограммы, приведенной на рис. 5, можно сделать вывод о минимальном скачке тока и напряжения, что, в свою очередь, уменьшает износ конденсаторных батарей.

Коммутация в наименее благоприятный момент времени, соответствующий максимальному значению напряжения, представлена на рис. 6.

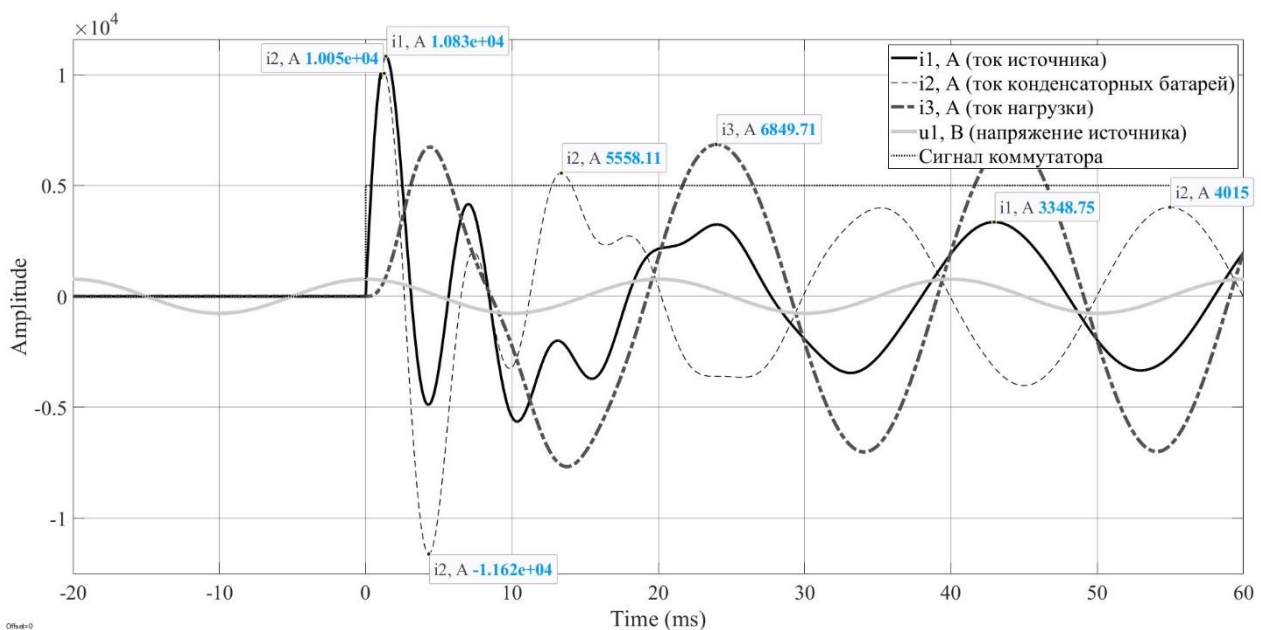


Рис. 6. Результаты моделирования переходных процессов при замыкании контактора при максимальном значении напряжения

На осциллограмме можно отметить возросшие амплитудные значения ударных токов и напряжений, увеличенное время протекания пере-

ходного процесса до 30 миллисекунд. На рис. 7 представлены токи через конденсаторную батарею Q_{200} и напряжения на ее выводах.

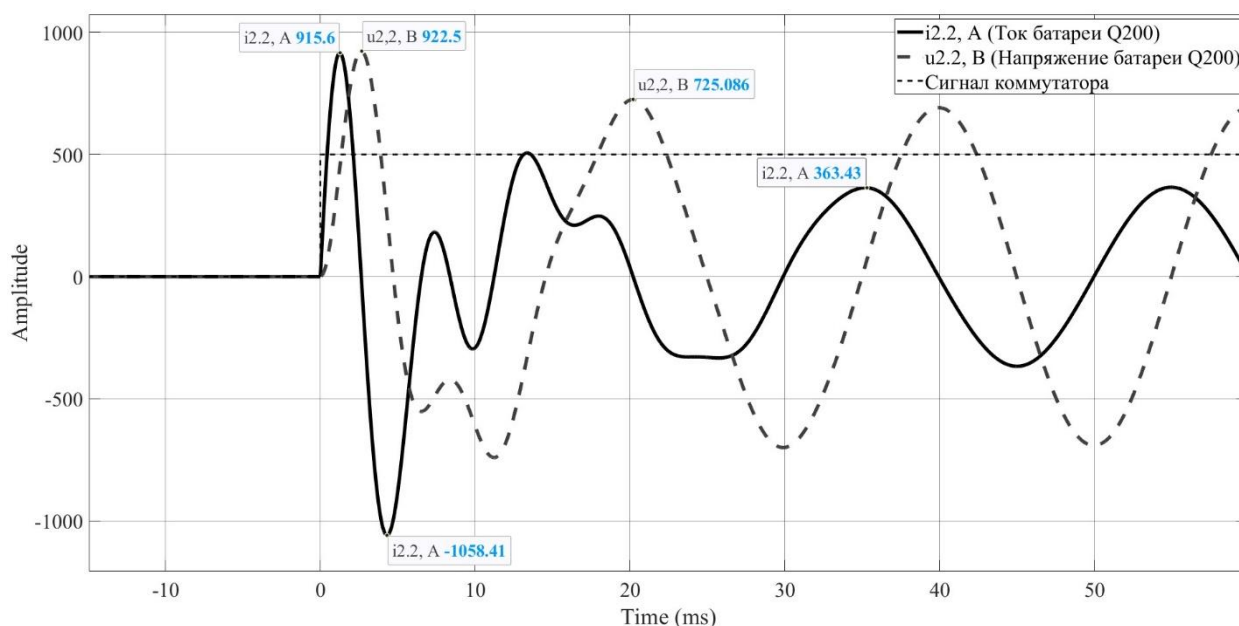


Рис. 7. Осциллограмма токов и напряжений, протекающих через конденсаторную батарею Q_{200} при включении цепи в неблагоприятный режим включения с минимальным количеством конденсаторных батарей

На осциллограмме отчетливо видно увеличение ударного значения токов и напряжений, что, в свою очередь, негативно сказывается на

сроке службы конденсаторных батарей.

Все параметры переходных режимов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры переходного режима при включении цепи

Режим коммутации	Ток источника	Ток ветви конденсаторов	Двухвыводковый конденсатор Q_{200} кВАр	
	I_1 , А	I_2 , А	$I_{2.2}$, А	$U_{2.2}$, В
Коммутация в нуле напряжения	6623	5352	487,5	760,3
Коммутация в максимуме напряжения	10 830	10 050	915,6	922,5

Остаточное напряжение на обкладках конденсаторных батарей не оказывает влияния на переходный режим ввиду наличия саморазрядки через группу специальных резисторов R и активное сопротивление индукционной печи.

Для отключения печи необходимо достичь режима, близкого к компенсации или перекомпенсации RLC контура, благодаря чему скачок тока при отключении цепи сглаживается, не оказывая влияния на надежность конденсаторных батарей. Результаты моделирования переходных процессов при размыкании контактора с включением всех конденсаторных батарей при коммутации в максимуме напряжения представлен на рис. 8.

Масляные, воздушные, элегазовые контакторы в связи с особенностями конструктивного исполнения производят гашение дуги в момент, когда ток дуги близок к нулю, тогда как вакуумный контактор имеет большую дугогасящую способность и способен разрывать ток в точке, близкой к максимальному амплитудному току. Осциллограмму данного переходного режима можно наблюдать на рис. 6. При определенных настройках резонанс контура индукционной печи – конденсаторных батарей может привести к высокочастотным колебаниям, приводящим к повышению токов и напряжений, протекающих в замкнутом контуре. Решением данных проблем может послужить применение

блока управляемой коммутацией вакуумного контактора [2].

На основании результатов проведенного моделирования произведен анализ целесообразности

установки системы управляемой коммутации для продления остаточного ресурса контактора выключателя и конденсаторных батарей.

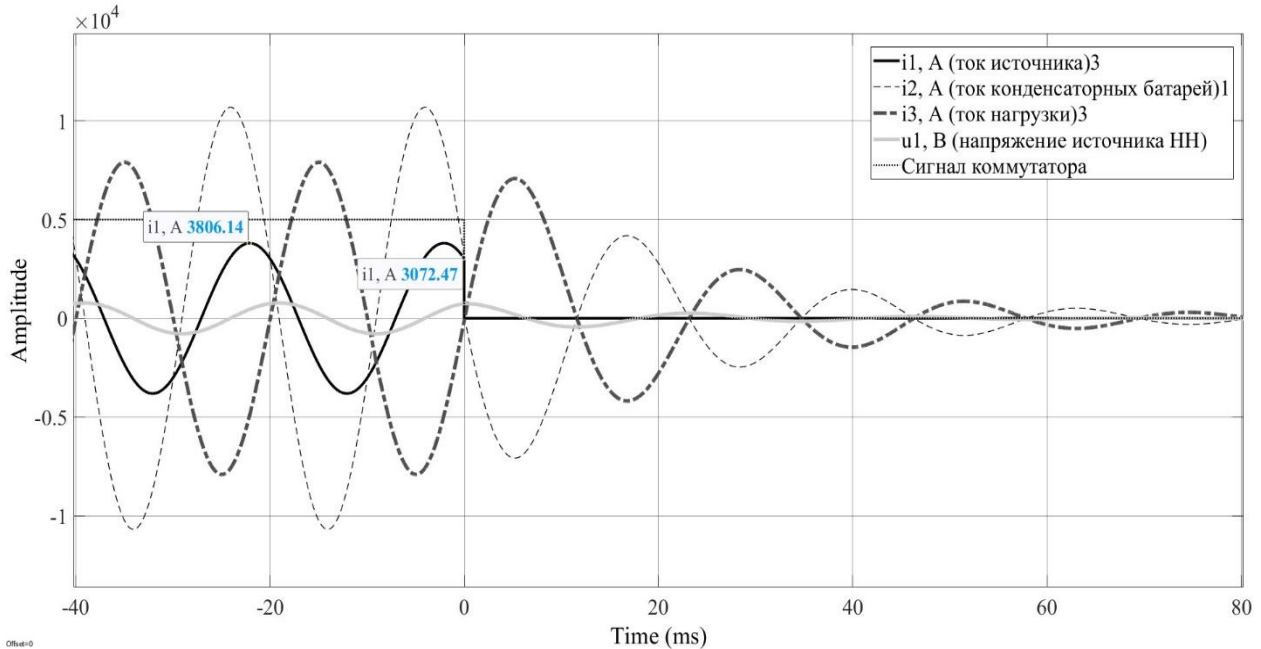


Рис. 8. Отключение цепи при частичной компенсации при прохождении тока источника через нуль

Расчет остаточного ресурса вакуумного контактора будет вестись на основе метода учета коммутационного износа по току отключения.

Эквивалентное число отключений при номинальном токе рассчитывается по формуле (1), коммутационный износ ресурса вакуумного контактора представлен формулой (2).

$$n_{\text{экв}} = \left(\frac{I_{\text{откл}}}{I_{\text{ном}}} \right)^k \quad (1)$$

где $n_{\text{экв}}$ – эквивалентное число отключений при номинальном токе, ОЕ / цикл В-О; $I_{\text{откл}}$ – паспортное значение рабочего тока контактора, А; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток вакуумного контактора, А; k – показатель степени износа контактора при разрыве дуги.

$$R_{\text{комм}} = \frac{n_{\text{экв}}}{N_{\text{ном}}} \quad (2)$$

где $R_{\text{комм}}$ – приведенный износ коммутационного ресурса на одно отключение, ОЕ / цикл В-О; $N_{\text{ном}}$ – максимальный ток гашения дуги при отключении нагрузки, А; $N_{\text{ном}}$ – коммутационный ресурс контактора при номинальном токе, ед.

Для приведения числа износа коммутационного аппарата к нормированному количеству отключений необходимо взять обратное значение от приведенного износа за цикл коммутационного ресурса, согласно формуле (3)

$$N = \frac{1}{R_{\text{комм}}} \quad (3)$$

где $R_{\text{комм}}$ – количество циклов коммутаций до истощения ресурса контактора, цикл;

Износ механического ресурса за одно отключение рассчитывается по формуле (4):

$$\Delta R_{\text{мех}} = \frac{1}{N_{\text{мех}}} \quad (4)$$

где $N_{\text{мех}}$ – механический ресурс контактора при номинальном токе, ед.;

Общий износ за одно отключение (5):

$$R = \max(R_{\text{мех}}, R_{\text{комм}}) \quad (5)$$

Или, если считать, что оба ресурса расходуются независимо, то ресурс контактора исчерпывается, когда исчерпан любой из ресурсов. Поэтому количество отключений до истощения (6):

$$N = \min \left(\frac{1}{R_{\text{мех}}}, \frac{1}{R_{\text{комм}}} \right) \quad (6)$$

В табл. 2 сведены результаты двух опытов оценки остаточного ресурса для однополюсного силового вакуумного контактора ВК-VM-1.5-C4-3200A-A2, механическая износостойкость 300 000 циклов В – О, электрическая износостойкость 100 000 циклов В – О. [6]

Представленная оценка коммутационного

ресурса является приблизительной, ввиду многовариативной изменчивости параметров коммутируемой цепи, которая зависит от количества включенных конденсаторных батарей, режима работы индукционной печи, физического состояния нагреваемого объекта, времени гашения дуги и другим возможным процессам.

Таблица 2

Оценка эффективности остаточного ресурса контактора

Контактор ВК-VM-1.5-C4-3200A-A2		
Измеряемый параметр	Без применения режима управляемой коммутации	Режим управляемой коммутации
Эквивалентное число отключений	1 ОЕ / цикл В-О	0,599 ОЕ / цикл В-О
Износ коммутационного аппарата на одно отключение	$5,566 \cdot 10^{-6}$ ОЕ / цикл В-О	$3,333 \cdot 10^{-6}$ ОЕ / цикл В-О
Количество циклов коммутаций до истощения электрического ресурса контактора	179 674 циклов В-О	689 062 циклов В-О
Количество циклов коммутаций до истощения ресурса контактора	179 674 циклов В-О	300 000 циклов В-О

Управляемая коммутация позволит увеличить срок службы конденсаторных батарей ввиду уменьшения ударного тока при включении и отключении цепи питания индукционной печи, что в свою очередь позволит сократить скорость старения конденсаторных батарей и уменьшить шанс аварийного выхода из строя индукционной печи. [4]

Вывод: в работе проведено моделирование электромагнитных процессов при коммутации цепи индукционной печи, укрупненно состоящей из силового трансформатора, вакуумного контактора, блока стационарных и управляемых конденсаторных батарей, индукционной печи.

Произведен расчет оценочной эффективности внедрения комплекса управляемой коммутацией для вакуумного контактора с целью повышения срока службы и надежности контактора и блоков конденсаторных батарей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назарычев, А. Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей / А. Н. Назарычев // Энергоэксперт, 2007. – № 4–5. – С. 58–63.
2. Базавлук, А. А. Исследование перенапряжений при коммутациях вакуумных выключателей / А. А. Базавлук, А. А. Бакиров, Д. А. Шкитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Электрификация и энергоэффективность, 2011. – № 4. – С. 265–279.
3. Бессонов, Л. А. Переходные процессы в линейных электрических цепях // Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. пособие / под ред. Л. А. Бессонова. 11-е изд., перераб. и доп. – М.: «Гардарики», 2007. – 701 с.
4. Белкин, Г. С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих «интеллектом») для коммутации цепей высокого напряжения / Г. С. Белкин // Электротехника, 2005. – № 12. – С. 3–9.
5. Баранов, А. В. Основы надежности электронных средств: учеб. пособие / под ред. А. В. Баранова, Н. П. Ямпурин. – НГТУ (АПИ), Н. Новгород, 2005. – 97 с.
6. Вакуумный контактор ВК-VM2000, 2600, 3200A/1500В: каталог 2023 [Электронный ресурс] / ООО ПТК «АкЭл». – Режим доступа: URL: <https://ak-el.ru/> (дата обращения: 27.10.2025 г.).