

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЦЕПИ СИНХРОННЫМ ВАКУУМНЫМ КОНТАКТОРОМ

Одержано залежність витрат на виконання однієї комутації синхронним вакуумним контактором від часу попередження і розкиду часу попередження розмикання контактів. Визначено межі допустимих значень часу попередження і розкиду часу попередження для різних рівнів витрат.

Получена зависимость затрат на выполнение одной коммутации синхронным вакуумным контактором от времени упреждения и разброса времени упреждения размыкания контактов. Определены границы допустимых значений времени упреждения и разброса времени упреждения для различных уровней затрат.

ВВЕДЕНИЕ

Как показали проведенные ранее исследования [1, 2], низковольтные синхронные вакуумные контакторы (СВК) имеют улучшенные в сравнении с другими типами контакторов технико-экономические показатели. Однако, выполненные в [1, 2] оценки, проводились только при оптимальных параметрах синхронного отключения (СО) [3]. В условиях реальной эксплуатации под воздействием большого количества возмущающих факторов параметры СО могут отклоняться от оптимальных. Поэтому, определение диапазона параметров синхронного отключения, при котором применение СВК является экономически выгодным, представляется актуальной задачей.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вопросам технико-экономического обоснования применения низковольтных контакторов посвящено большое количество публикаций, что косвенно подтверждает актуальность рассматриваемой темы.

В работе [4] выполнено технико-экономическое сравнение контактных, гибридных и тиристорных контакторов. Сравнение проводилось по таким техническим параметрам, как максимальный ток в режиме применения АС-4, коммутационная износостойкость, механическая износостойкость, масса, объём, мощность потерь в контактах во включенном состоянии, мощность потерь в катушке электромагнитного привода, мощность потерь в электрической дуге. Для гибридных контакторов рассчитана масса сэкономленной меди в сравнении с контактными аппаратами. Количественное экономическое сравнение проведено только по отношению "цена расходуемой электроэнергии / цена контактора". Сравнение по затратам на обслуживание контакторов выполнено без указания конкретных цифр, с использованием качественных характеристик "больше – меньше".

В работе [5] приведено сравнение гибридных контакторов КТ64 и КТП64 с электромагнитными контакторами КТ6000 и КТП6000 по коммутационной износостойкости. В качестве экономического параметра приводится срок окупаемости гибридного контактора.

При использовании перечисленных показателей полноценное экономическое сравнение выполнить сложно, так как сравниваемые контакторы имеют разный срок службы, а такие технические параметры,

как коммутационная и механическая износостойкости рассматриваются вне связи с зависящими от них экономическими показателями.

Для более корректного экономического сравнения контакторов в [1, 2] предложено использовать такой показатель, как затраты на одну коммутацию (ЗОК), выполненную аппаратом. При расчёте ЗОК учитываются затраты на приобретение контактора, затраты на приобретение и замену контактов, дугогасительных камер и гибких связей, а также затраты на обслуживание контактора. В предложенную формулу входят коммутационная и механическая износостойкости, количество замен контактов, дугогасительных камер и гибких связей, что позволяет объединить технические и экономические параметры и представить результаты сравнения количественно.

Кроме перечисленных причин, основанием для проведения нового технико-экономического сравнения является отсутствие в работах [4, 5] данных по СВК.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение диапазона экономически обоснованных параметров синхронного отключения при коммутации низковольтной цепи синхронным вакуумным контактором.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коммутационная износостойкость СВК зависит от ряда параметров, среди которых наиболее значимыми являются время упреждения размыкания контактов перед нулём отключаемого тока t_y и разброс времени упреждения Δt_y . Учитывая такую зависимость, формулу для определения ЗОК, приведенную в [1, 2] можно уточнить:

$$Z_{OK} = \frac{Z_K + n_K \cdot (Z_{ПК} + Z_{ЗК}) + n_D \cdot (Z_{ПД} + Z_{ЗД})}{N_M} + \frac{n_G \cdot (Z_{ПГ} + Z_{ЗГ}) + Z_O}{N_M}, \quad (1)$$

где Z_K – затраты на приобретение контактора, грн; $Z_{ПК}$ – затраты на приобретение контактов, грн; $Z_{ЗК}$ – затраты на замену контактов, грн; n_D – количество замен дугогасительных камер контактора; $Z_{ПД}$ – затраты на приобретение дугогасительных камер, грн; $Z_{ЗД}$ – затраты на замену дугогасительных камер, грн; n_G – количество замен гибких связей контактора; $Z_{ПГ}$ – затраты на

приобретение гибких связей, грн; $Z_{3Г}$ – затраты на замену гибких связей, грн; Z_0 – затраты на обслуживание контакторов (проверка раствора контактов, проверка и регулировка провалов, контактных нажатий и др.), грн; n_K – количество замен контактов контактора:

$$n_K = \frac{N_M}{N_K(t_y, \Delta t_y)}. \quad (2)$$

Зависимость коммутационной износостойкости N_K от времени упреждения t_y и разброса времени упреждения Δt_y исследована с помощью математических моделей и экспериментально [6, 7]. Было установлено, что, из-за особенностей износа контактов низковольтных вакуумных дугогасительных камер при синхронном отключении разброс времени упреждения может быть достаточно большим с сохранением приемлемых значений износостойкости N_K . Особенностью работы СВК при большом разбросе времени упреждения является то, что распределение времени упреждения перестаёт подчиняться нормальному закону. В результате проведенных исследований установлено [8], что при выполнении условий

$$0 \leq t_p < a, \quad (3)$$

где $t_p = T/2 - t_y$ – момент размыкания контактов, а = $T/2$ – вторая точка наложения ветви распределения, и $(3 \cdot \sigma_p - T/2) \leq m_p \leq (T - 3 \cdot \sigma_p)$,

$$(3 \cdot \sigma_p - T/2) \leq m_p \leq (T - 3 \cdot \sigma_p), \quad (4)$$

где σ_p – среднее квадратическое отклонение момента размыкания контактов t_p , m_p – математическое ожидание момента размыкания контактов, закон распределения времени упреждения СВК может быть представлен следующим выражением:

$$f(t_p) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_p}} \times \frac{(t_p - m_p)^2}{2 \cdot \sigma_p^2} + e^{-\frac{(t_p - m_p + a)^2}{2 \cdot \sigma_p^2}} + e^{-\frac{(t_p - m_p - a)^2}{2 \cdot \sigma_p^2}}. \quad (5)$$

Отличие распределения (5) от нормального обусловлено тем, что в нём имеются две точки наложения. Первая точка наложения $t_p = 0$ – начало полупериода, а вторая точка наложения $t_p = a = T/2$ – конец полупериода отключаемого тока. В точках наложения происходит отсечение ветвей распределения, их смещение на $T/2$ и наложение на основную ветвь. Распределение (5) классифицировано как нормальное наложение с двумя точками наложения [8].

Для расчёта ЗОК с учётом установленной зависимости $N_K(t_y, \Delta t_y)$ был предложен алгоритм и составлена программа, результаты расчёта по которой показаны на рис. 1.

Анализ вида полученной зависимости позволяет сделать следующие выводы:

- величина ЗОК значительно изменяется при изменении времени упреждения, достигая минимума при малых и максимума при больших значениях t_y ;
- в области малых значений t_y (во второй половине полупериода отключаемого тока) увеличение разброса времени упреждения приводит к увеличению ЗОК;
- в области больших значений t_y (в первой половине полупериода отключаемого тока) увеличение разброса времени упреждения приводит к уменьшению ЗОК.

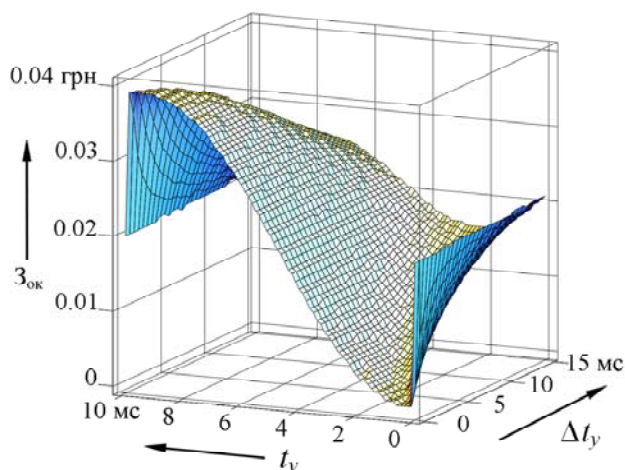


Рис. 1. Затраты на одну коммутацию, выполненную синхронным вакуумным контактором при различных значениях времени упреждения t_y и разброса времени упреждения размыкания контактов Δt_y

Более детально зависимость ЗОК от разброса времени упреждения можно проанализировать с помощью рис. 2.

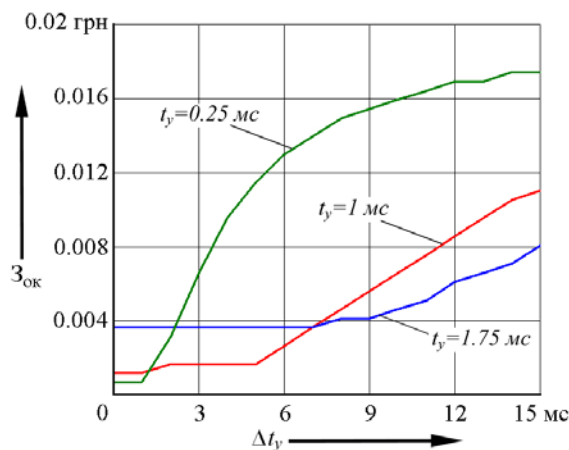


Рис. 2. Затраты на одну коммутацию, выполненную синхронным вакуумным контактором при различных значениях разброса времени упреждения и фиксированном времени упреждения размыкания контактов

Как следует из рис. 2, наименьшие затраты могут быть получены при наименьшем разбросе и наименьшем времени упреждения (кривая при $t_y = 0.25$ мс на участке, где Δt_y находится в пределах от 0 до 1 мс). Однако, если в процессе эксплуатации разброс времени упреждения возрастёт даже незначительно, ЗОК резко увеличивается и уже при $\Delta t_y = 2$ мс в два раза превосходит затраты при $t_y = 1$ мс. Такое поведение функции необходимо учитывать при выборе времени упреждения СВК: если в процессе эксплуатации аппарата высока вероятность увеличения разброса времени упреждения, то целесообразно выбирать большее время упреждения, чем это можно было бы сделать, руководствуясь только начальным значением Δt_y . По мере увеличения времени упреждения влияние разброса на ЗОК уменьшается, но при этом сами затраты увеличиваются (кривая при $t_y = 1.75$ мс).

Зависимости ЗОК показанные на рис. 3, позволяют сделать вывод о том, что каждому разбросу вре-

мени упреждения соответствует своё значение времени упреждения, при котором достигаются минимальные затраты. При этом, увеличение Δt_y приводит к увеличению t_y , обеспечивающему минимум ЗОК. На этом же рисунке видно, что даже при очень больших разбросах времени упреждения (кривая при $\Delta t_y = 15$ мс) правильный выбор t_y обеспечивает преимущество синхронного отключения перед несинхронным. Полученные зависимости показывают, что при увеличении Δt_y ЗОК стремится к уровню 0.02 грн. Это можно объяснить тем, что отключение с бесконечно большим разбросом времени упреждения фактически является несинхронным отключением, а уровень затрат 0.02 грн соответствует именно несинхронному отключению [2].

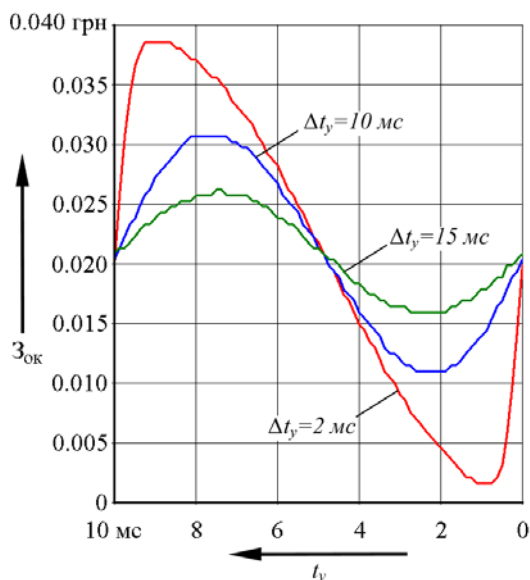


Рис. 3. Затраты на одну коммутацию, выполненную синхронным вакуумным контактором при различных значениях времени упреждения и фиксированном разбросе времени упреждения размыкания контактов

На рис. 4 показаны линии уровня, соответствующие разным значениям ЗОК. Пользуясь приведенными зависимостями, можно определить диапазон t_y и Δt_y при котором достигается желаемый уровень ЗОК. Например, если затраты на одну коммутацию не должны превышать 0.005 грн, то синхронный вакуумный контактор должен иметь разброс времени упреждения не более 5.5 мс, а само время упреждения может быть установлено в пределах от 0 до 2.2 мс. При этом, как видно из рис. 4 и 5, комбинация максимальных значений параметров t_y и Δt_y недопустима, а точка, обозначающая сочетание этих параметров при эксплуатационном дрейфе, не должна пересекать границу заданного уровня ЗОК.

В экспериментальном образце СВК на номинальный ток 400 А реализованы значения $t_y = 1$ мс и $\Delta t_y = 2$ мс. На рис. 4, 5 этим параметрам соответствует точка, обозначенная символом \oplus , которая расположена в области затрат на одну коммутацию, не превышающих 0.002 грн.

На рис. 5 выделена область, в пределах которой для экспериментального образца СВК затраты на одну коммутацию не превышают 0.002 грн.

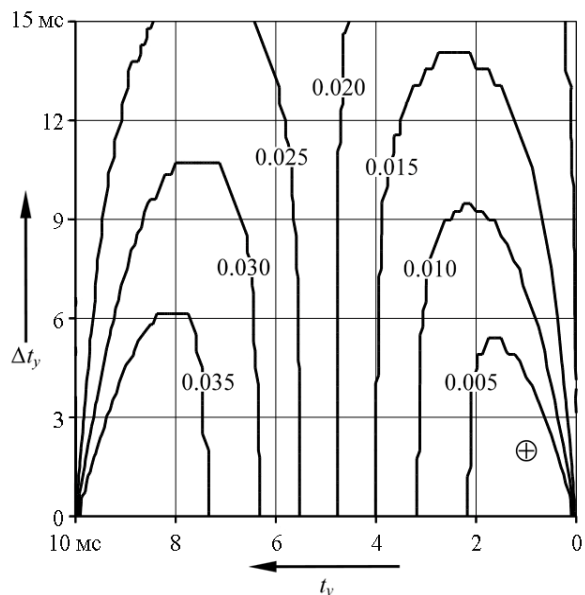


Рис. 4. Линии уровня затрат в гривнях на одну коммутацию в проекции на плоскость параметров Δt_y и t_y для синхронного вакуумного контактора

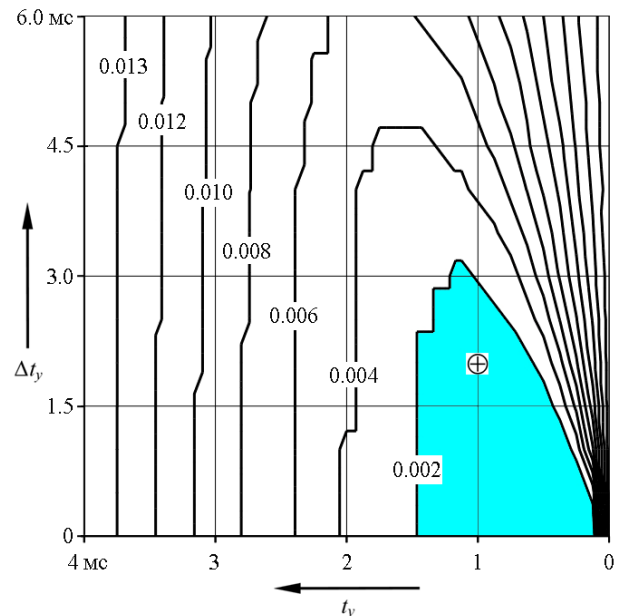


Рис. 5. Линии уровня затрат на одну коммутацию для экспериментального образца СВК. Выделена область параметров Δt_y и t_y , в которой затраты не превышают 0.002 грн

Некоторая ступенчатость поверхности на рис. 1 и линий на рис. 2-5 объясняется тем, что при плавном изменении параметров t_y и Δt_y затраты на коммутацию могут меняться скачкообразно. Это происходит, например, при переходе от варианта сочетания параметров t_y и Δt_y определяющего количество замен n некоторого комплектующего, к варианту с количеством замен $n+1$ или $n-1$. При изменении количества замен эксплуатационные затраты ступенчато изменяются на величину затрат, связанных с заменой данного комплектующего.

Чем меньше разброс времени упреждения, тем шире диапазон изменения t_y , обеспечивающий заданный уровень затрат. С увеличением разброса этот диапазон сужается (рис. 5).

ВЫВОДЫ

1. Для повышения информативности технико-экономического сравнения контакторов целесообразно использовать удельный показатель – затраты на одну коммутацию.

2. Полученная зависимость затрат на выполнение одной коммутации синхронным вакуумным контактором от времени упреждения и разброса времени упреждения размыкания контактов позволяет определить диапазон значений t_y , Δt_y , при котором затраты на коммутацию не превышают заданного значения.

3. Для повышения точности определения границ диапазона в расчётную формулу могут быть введены дополнительные технико-экономические показатели, например, затраты на простое оборудования, связанные с необходимостью замены изнашиваемых деталей контактора, затраты на ликвидацию аварий и другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верхола А.В. Оценка технических и экономических характеристик синхронного вакуумного контактора // Вісник Криворізького технічного університету. – 2010. – №25. – С. 41-46.
2. Верхола А.В. Энергоресурсосберегающие свойства синхронного вакуумного контактора // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – №3/2011 (15). – С. 122-124.
3. Верхола А.В. Решение задачи оптимизации процесса отключения цепи синхронным вакуумным контактором // Вестник ХГПУ. – 2000. – №84. – С. 37-40.
4. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
5. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита: учебник. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с.
6. Верхола А.В. Методика оценки коммутационного износа контактов синхронного вакуумного контактора // Электрические контакты и электроды – Киев: Ин-т пробл. материаловед. им. И.Н. Францевича НАН Украины. – 1999. – С. 56-62.
7. Верхола А.В. Влияние износа контактов вакуумной дугогасительной камеры на величину времени упреждения синхронного вакуумного контактора // Вісник СНУ. – 2004. – №12(82). – С. 20-25.
8. Верхола А.В. Методика обработки экспериментальных данных при измерении временных параметров синхронного вакуумного контактора // Вестник ХГПУ. – 2000. – №80. – С. 88-91.

Bibliography (transliterated): 1. Verkhola A.V. Otsenka tehniceskikh i ekonomicheskikh harakteristik sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu*, 2010, no.25, pp. 41-46. 2. Verkhola A.V. Energoresursosberegayuschie svoystva sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, 2011, no.3/2011 (15), pp. 122-124. 3. Verkhola A.V. Reshenie zadachi optimizatsii protsessa otklyucheniya tsepi sinhronnym vakuumnym kontaktorom. *Vestnik HGPU*, 2000, no.84, pp. 37-40. 4. Mogilevskiy G.V. *Gibridnye elektricheskie apparaty nizkogo napryazheniya*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 232 p. 5. Soskov A.G., Soskova I.A. *Poluprovodnikovye apparaty: kommutatsiya, upravlenie, zaschita: uchebnyk*. Kyiv, Karavella Publ., 2005. 344 p. 6. Verkhola A.V. Metodika otsenki kommutatsionnogo iznosa kontaktov sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Elektricheskie kontakty i elektrody*, 1999, pp. 56-62. 7. Verkhola A.V. Vliyaniye iznosa kontaktov vakuumnoy dugogasitel'noy kamery na velichinu vremeni uprezhdeniya sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Visnyk SNU*, 2004, no.12(82), pp. 20-25. 8. Verkhola A.V. Metodika obrabotki eksperimentalnykh dannykh pri izmerenii vremennykh parametrov sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Vestnik HGPU*, 2000, no.80, pp. 88-91.

Поступила (received) 15.10.2013

Верхола Александр Владимирович,
Донбасский государственный технический университет,
94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина, 16,
тел./phone +380 06442 23123, e-mail: verkhola@mail.ru

A.V. Verkhola
Donbass State Technical University
16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine
Determination of economically justified parameters of synchronous disconnection at low-voltage circuit switching via a synchronous vacuum contactor.
Dependence of a single switching procedure cost upon the contact opening delay time and delay-time spread is derived for a low-voltage synchronous vacuum contactor. For different cost levels, boundaries of permissible values of delay-time and delay-time spread are specified.
Key words – low-voltage synchronous vacuum contactor, delay time, delay-time spread, cost levels, contact opening.