

*Ст. научн. сотруд. Ламанов С. Л.
вед.научн.сотр, канд. техн. наук Комиссаренко А. И.
канд. техн. наук Мельничук В. Н.
ст. научн. сотруд. Богданов В. К.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ АППАРАТОВ С ОТДЕЛЕНИЕМ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Проведено аналіз умов роботи гібридних апаратів з відокремленням джерела живлення в період відключення. Поставлена та вирішена задача оптимізації основної інтегральної характеристики шунтуючого контуру гібридного апарату за наявності в ньому дуги відключення.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Гибридные коммутационные аппараты имеют все большее распространение в промышленности, т.к. позволяют сочетать свойства контактных и полупроводниковых элементов. Однако, обычно чем сильнее подавляется дуга отключения в гибридном аппарате, тем сложнее его схема, особенно в аппаратах постоянного тока. Поэтому представляет интерес совершенствование не только схем гибридных аппаратов, но и конструкций контактно-дугогасительных устройств добиваясь их оптимального сочетания и снижения стоимости, габаритов, повышения надежности аппарата в целом.

Анализ исследований и публикаций.

Среди имеющихся схемных решений гибридных аппаратов постоянного тока [1] можно выделить группу схем, принцип действия которых предполагает отделение источника питания в начальный момент коммутации с последующим рассеиванием запаса электромагнитной энергии на активном сопротивлении нагрузки и в дуге отключения [2]. Схема замещения таких отключающих устройств представлена на рисунке 1.

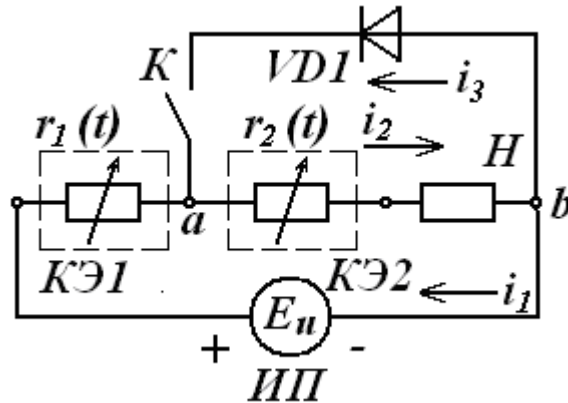


Рисунок 1. – Схема замещения отключающих устройств с отделением источника питания

Постановка задачи.

Для целенаправленного подхода к исследованиям аппаратов с отделением источника питания необходимо знать условия их оптимального функционирования и предельные возможности улучшения ими основных характеристик процесса отключения. Для этого проведем анализ процессов в схеме рис.1.

Схема содержит последовательно соединенные с источником питания коммутирующие нагрузку \$H\$ элементы КЭ1 и КЭ2 в виде параметрических резисторов с сопротивлениями \$r_1(t)\$ и \$r_2(t)\$ соответственно, параллельно нагрузке и КЭ2 включены ключ \$K\$ и встречно с источником питания – диод \$VD1\$. Ключ \$K\$ может быть постоянно замкнут или замыкаться в определенный момент \$t_k\$ периода отключения. До начала коммутации и после нее ключ \$K\$ может быть разомкнут или замкнут.

Изложение материала и его результаты.

При рассмотрении процесса отключения нагрузки индуктивностью и внутренним сопротивлением источника питания пренебрегаем. Все параметры выражены в относительных единицах [3]. Падение напряжения на КЭ1 обозначим \$u_1^*\$, на КЭ2 – \$u_2^*\$. Схема в общем случае работает следующим образом (основные моменты процесса коммутации и изменение временных характеристик можно проследить по рис. 2).

В начальный момент коммутации:

$$i^* = 0; i_1^* = i_2^* = I_n^* = 1; i_3^* = 0; u_1^* = u_2^* = 0, \quad (1)$$

где \$i_1^*\$ – ток в цепи источника питания;

\$i_2^*\$ – ток нагрузки;

\$i_3^*\$ – ток в цепи диода \$VD1\$,

ключ К разомкнут. С этого момента сопротивления $r_1(t)$ и $r_2(t)$ начинают увеличиваться, а ток i_1^* начинает уменьшаться. В момент времени t_κ^*

(в зависимости от схемы и конструкции гибридного аппарата, это время может изменяться в пределах $0 \leq t_\kappa^* \leq t_\delta^*$) замыкается ключ К и при определенных условиях, в момент t_c^* , за счет ЭДС самоиндукции нагрузки открывается диод VD1, который шунтирует последовательно соединенные нагрузку и КЭ2, при этом создаются условия для отделения источника питания (сопротивление r_1 увеличивается до бесконечности). Считаем, что срез тока i_1 происходит мгновенно, поэтому, в момент t_c^* имеем:

$$i_1^* = 0; i_2^* = i_3^*; u_1^* = 1. \quad (2)$$

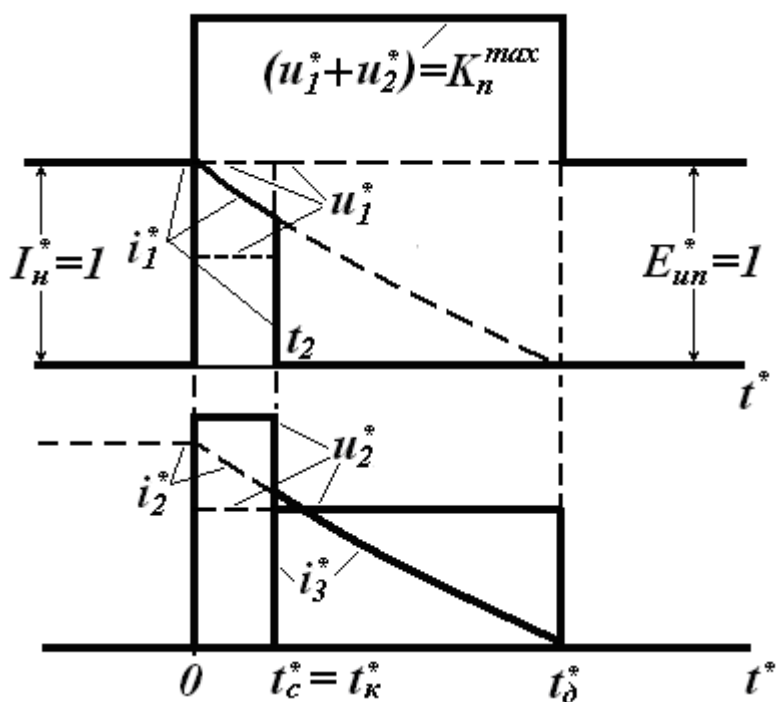


Рисунок 2 – Изменение токов и напряжений в гибридных аппаратах с отделением источника питания

Оставшаяся к моменту t_c^* часть энергии электромагнитного поля нагрузки рассеивается в виде тепла через шунтирующий диод VD1 на r_2 и на активном сопротивлении нагрузки. В момент времени t_δ^* имеем:

$$i_1^* = i_2^* = i_3^* = 0. \quad (3)$$

Определим условия функционирования схемы, при которых интегральные показатели процесса коммутации будут наилучшими.

Из принципа работы схемы ясно, что до момента замыкания ключа К (или отпириания диода) она эквивалентна схеме обычного аппарата. Уравнение баланса ЭДС и напряжений в этот период имеет вид:

$$E_u^* - L_H^* \frac{di_1^*}{dt^*} = R_H^* i_1^* + (u_1^* + u_2^*), (0 \leq t^* < t_c), \quad (4)$$

где $E_u^* = L_H^* = R_H^* = 1$ – соответственно ЭДС источника питания, индуктивность и активное сопротивление нагрузки в относительных единицах.

На суммарное напряжение на коммутирующих элементах накладывается ограничение:

$$0 \leq (u_1^* + u_2^*) \leq K_{II}^{\max}, \quad (5)$$

где K_{II}^{\max} – максимально допустимая величина коммутационных перенапряжений в последовательной схеме коммутации.

Процессы в последовательной схеме коммутации требуют отдельного рассмотрения. Известно, что минимальное время коммутации достигается при максимальных K_{II} [4], поэтому можно записать:

$$u_1^*(t^*) + u_2^*(t) = K_{II}^{\max}. \quad (6)$$

При замыкании ключа К после перетекания тока i_2 в цепь диода VD1 происходит отделение источника питания. Для этого необходимо чтобы напряжение на точках «а» и «b» (рис. 1) изменило свой знак (за счет ЭДС самоиндукции e_M), то есть можно записать:

$$L_H^* \frac{di_2^*}{dt^*} + i_2^* R_H^* + u_2^* = -U_0^*, \quad (7)$$

где U_0^* – прямое падение напряжения на диоде VD1.

Очевидно, что чем раньше произойдет отделение источника питания, тем лучше будут интегральные характеристики процесса коммутации и наилучшими условиями являются те, при которых перетекание

тока i_2 в шунтирующую цепь произойдет в момент замыкания ключа К, то есть, когда t_K равно t_c . Момент t_K в общем случае может быть произвольным, поэтому необходимо, чтобы условие отключения источника питания соблюдалось с самого начала коммутации. Определим его.

Учитывая, что в момент t_c ток i_1 равен току i_2 , из (4), с учетом (7) следует:

$$L_H^* \frac{di_2^*}{dt^*} + i_2^* R_H^* + u_2^* = E_u^* - u_1^* = -U_0^*, \quad (8)$$

откуда условие отключения источника питания:

$$u_1^* = E_u^* + U_0^*. \quad (9)$$

Условие (9) определяет минимально необходимое напряжение на КЭ2. В принципе u_1^* может быть больше, то есть можно записать:

$$u_1^*(t^*) \geq E_u^* + U_0^*. \quad (10)$$

Тогда можно записать оптимальные условия работы схемы до момента отключения источника питания:

$$\begin{cases} u_1^*(t^*) \geq E_u^* + U_0^*; \\ u_1^*(t^*) + u_2^*(t^*) = K_{II}^{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

После отключения источника питания ток i_3^* в оставшемся контуре поддерживается за счет ЭДС самоиндукции нагрузки. Процесс отключения закончится, когда израсходуется весь запас электромагнитной энергии. Решение вопроса об оптимальных условиях процесса рассеивания запаса электромагнитной энергии нагрузки после отключения источника питания не является однозначным. Решение зависит от выбранного критерия оптимальности. Если критерием является энерговыделение на КЭ2, то решение задачи его минимизации очевидно, поскольку сопротивление КЭ2, в данном случае, может быть равным нулю и энергия на нем выделяться не будет. Ток при этом будет определяться из уравнения

$$L_H^* \frac{di_3^*}{dt^*} + i_3^* R_H^* = 0, \quad (12)$$

следующим образом:

$$i_3^* = i_c^* \exp\left(-\frac{t^* R_H^*}{L_H^*}\right). \quad (13)$$

Анализ (13) показывает, что при таком управлении процессом отключения нагрузки время отключения стремится к бесконечности. На практике это время будет определяться величиной L_H / R_H и для индуктивной нагрузки будет слишком велико.

В рассматриваемой цепи, согласно принципу ее действия, после отделения источника питания нельзя сократить общее количество выделяющейся энергии, так как оно является минимально возможным. За обобщенный показатель, наиболее полно характеризующий процесс отключения цепи в приведенной схеме, может быть принято количество электричества, которое протекает в цепи за период отключения. До момента t_c оно выражается в относительных единицах функционалом

$$Q_1^* = \int_0^{t_c^*} i_1^* dt^* \equiv W_u^*, \quad (14)$$

а после –

$$Q_2^* = \int_{t_c^*}^{t_\delta^*} i_3^* dt^*, \quad (15)$$

где W_u – количество энергии, поступившей из источника питания.

Учитывая, что ток i_2^* в нагрузке и КЭ2 до момента t_c равен току i_1^* , а после – равен i_3^* и то, что ток i_2^* , согласно основным законам коммутации, является непрерывной функцией, можно записать для всего периода коммутации:

$$Q^* = \int_0^{t_c^*} i_2^* dt^* + \int_{t_c^*}^{t_\delta^*} i_2^* dt^* = \int_0^{t_\delta^*} i_2^* dt^*. \quad (16)$$

Таким образом, критерий (16) является интегральной характеристикой процесса отключения цепи в схеме рис.1, как до, так и после отделения источника питания E_u .

Определим оптимальное значение критерия (15), которое наиболее полно характеризует работу рассеивающего контура. Сформулируем условие задачи. Рассматриваемая электрическая цепь на интервале времени $t_2^* \leq t^* \leq t_\delta^*$ описывается следующим уравнением в относитель-

ных единицах:

$$\frac{di_3^*}{dt^*} + i_3^* + u_2^* = 0, \quad (17)$$

при начальных условиях:

$$i_3^*(t_c^*) = i_c^*; \quad u_2^*(t_c^*) = u_c^*. \quad (18)$$

На напряжение u_2^* накладываются ограничения:

$$0 \leq u_2^*(t^*) \leq K_{\Pi 1}^{\max}, \quad (19)$$

где $K_{\Pi 1}^{\max}$ – максимально допустимая величина коммутационных перенапряжений на КЭ2.

Приняв напряжение u_2^* на КЭ2 за управляющее воздействие, определим алгоритм управления, переводящий объект из начального состояния (18) в конечное:

$$i_3^*(t_o^*) = 0, \quad (20)$$

при этом критерий-функционал (15) должен принимать минимальное значение.

Поставленная задача относится к классу вариационных задач на условный экстремум и может быть решена математическими методами теории оптимального управления. Проведем ее решение на основе принципа максимума Л.С.Понтрягина.

Запишем систему уравнений, описывающую объект, с учетом (15):

$$\begin{cases} \frac{di^0}{dt^*} = i_3^* = f^0; \\ \frac{di_3^*}{dt^*} = -i_3^* - u_2^* = f^1. \end{cases} \quad (21)$$

Запишем функцию Гамильтона:

$$H = \psi^0 i_3^* - \psi^1 i_3^* - \psi^1 u_2^*. \quad (22)$$

С учетом (19), согласно принципу максимума, запишем алгоритм оптимального управления:

$$u_2^* = 0,5K_{II1}^{\max} [1 - \text{sign}(\psi^1)]. \quad (23)$$

Для определения управления u_2^* в функции времени запишем систему сопряженных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\psi^0}{dt^*} = 0; \\ \frac{d\psi^1}{dt^*} = -\psi^0 + \psi^1. \end{cases} \quad (24)$$

Из (24) имеем:

$$\psi^1 = \exp(t^* - t_{\delta}^*) - 1. \quad (25)$$

Анализ (25) позволяет определить знак переменной ψ^1 на интервале управления:

$$\psi^1 < 0, (t_c^* < t^* < t_{\delta}^*). \quad (26)$$

С учетом (26) окончательно записывается алгоритм управления, оптимальный с точки зрения количества электричества (15):

$$u_{2_0}^*(t^*) = K_{II1}^{\max} = \text{const}. \quad (27)$$

С учетом (26) имеем:

$$1 + K_{II1}^{\max} = K_{II}^{\max}, \quad (28)$$

откуда:

$$K_{II1}^{\max} = K_{II}^{\max} - 1. \quad (29)$$

Таким образом, алгоритм оптимального управления имеет релейный характер и предусматривает постоянство напряжения на КЭ2 с предельно допустимым уровнем, определяемым (29). То есть, после отделения источника питания предельно допустимый уровень коммутационных перенапряжений в рассеивающем контуре должен быть снижен на единицу, так как часть ЭДС самоиндукции уже не компенсируется ЭДС источника питания. Напряжение на КЭ2 после отделения источни-

ка питания может изменяться в пределах:

$$0 \leq u_2^*(t^*) \leq K_{II}^{\max} - 1. \quad (30)$$

Подстановкой (27) в (17) определяется оптимальное изменение тока в рассеивающем контуре:

$$i_{3_0}^*(t^*) = C * \exp(-t^*) - K_{II}, \quad (31)$$

где C – постоянная интегрирования; $K_{II} = u_{2_0}^*$.

С учетом условий (18), имеем:

$$i_{3_0}^* = i_c^* \exp(t_c^* - t^*) - K_{II} [1 - \exp(t_c^* - t^*)], \quad (32)$$

откуда с учетом (20) определяется время рассеивания электромагнитной энергии после отключения источника питания:

$$t_{\partial o}^* = t_c^* + \ln \frac{K_{II} + 1}{K_{II}}, \quad (33)$$

или, если отключение источника питания осуществляется в начальный момент коммутации, т.е. когда

$$t_c^* = 0, \quad i_c^* = 1, \quad (34)$$

время $t_{\partial o}^*$ будет равно:

$$t_{\partial o}^* = \ln \frac{1 + K_{II}}{K_{II}}. \quad (35)$$

Определим аналитические выражения для интегральных характеристик рассеивающего контура в рассматриваемой схеме для случая (34) с учетом (33, 34)

$$Q_{oo}^* = \int_0^{t_{\partial o}^*} i_{3_0}^*(t^*) dt^* = 1 - K_{II} \ln \frac{K_{II} + 1}{K_{II}}. \quad (36)$$

Выводы и направление дальнейших исследований.

Таким образом, определены условия отделения источника питания и оптимальные условия работы гибридных аппаратов с отделением источника питания. Результаты исследований позволяют обоснованно подходить к проектированию таких аппаратов, целенаправленно вести поиск конструкций, обеспечивающих максимальную эффективность.

Найденные математические выражения оптимальных параметров могут быть положены в основу разработки объективных критериев оценки и сравнения качества процесса отключения коммутационными аппаратами с отделением источника питания.

Проведен анализ условий работы гибридных аппаратов с отделением источника питания в период отключения. Поставлена и решена задача оптимизации основной интегральной характеристики шунтирующего контура гибридного аппарата при наличии в нем дуги отключения.

The analysis of condition of work of hybrid switching units is conducted with the separation of source of feed in the period of disconnecting. Put and decided task of optimization of basic integral description of bypass contour of hybrid switching units at presence of in him arcs of disconnecting.

Библиографический список

1. Розанов. Ю.К., Акимов Е.Г. Основные тенденции развития силовых коммутационных аппаратов управления и защиты низкого напряжения. – *Электротехника*, 1997. №1.
2. Ткаченко Ю.С., Мельничук В.Н. Энергетический баланс дуговых коммутаторов в отключающих аппаратах постоянного тока. – *Сб/Электротехническая промышленность: Сер. Аппараты низкого напряжения*, 1976, №8, с.1-3
3. Комиссаренко А.И., Ламанов С.Л. Методика исследований процесса отключения цепей постоянного тока контактными коммутационными аппаратами. *Вісн. Східноукр. нац. Ун-ту им В.Даля.*-2002-№1(47) с18-24
4. Канов Л.Н., Марактанов В.А., Скляр Ю.С. Оптимальное управление коммутационными процессами в электрических цепях постоянного тока. – В кн.: Третий национальный симпозиум с международным участием СИЕЛА-77: Перспективы и проблемы автоматического электроаппаратостроения низкого напряжения. Доклады. Пловдив, 1977, с.89-74