

В. И. Гуревич

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО КЛЮЧА С САМОУПРАВЛЕНИЕМ НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ СО СТАЛЬЮ

Управление встречно-параллельно соединенными тиристорами импульсами, автоматически формирующимися из анодного напряжения (так называемое самоуправление), имеет существенные преимущества по сравнению с другими методами управления при работе на переменном токе промышленной частоты в ключевом режиме и при отсутствии жестких требований к стабильности угла включения тиристорov. Такой метод управления применяется в тиристорных пускателях [1], переключателях ответвлений силовых трансформаторов [2] и т.д.

Достаточно подробные исследования тиристорного ключа с самоуправлением, работающего на индуктивную нагрузку, и особенности схемы самоуправления рассмотрены в [3]. Дальнейшие исследования работы тиристорного ключа с самоуправлением, схема которого приведена на рис. 1, показали, что при работе на индуктивную нагрузку со сталью тиристоры даже с пренебрежимо малым значением разности статических токов управления ΔI_y (сотые, тысячные доли ампера) способны привести к глубокому насыщению магнитной системы нагрузки (например, трансформатора в режиме холостого хода). Режим глубокого насыщения (РГН) может возникнуть в подобных случаях вследствие "эффекта накопления индукции", возникающего при условии [4]

$$\int_0^{T_1} U_1 dt - \int_0^{T_2} U_2 dt > \Delta \Phi_{0 \min} W_1. \quad (1)$$

где U_1 и U_2 — положительные и отрицательные импульсы напряжения, приложенные к первичной обмотке с числом витков W_1 ; $\Delta \Phi_{0 \min}$ — минимальное пороговое значение потока, превышение которого ведет к интегрированию потока магнитопровода вплоть до выхода рабочей точки на горизонтальный участок петли гистерезиса.

Однако подобный режим известен только для магнитопроводов с прямоугольной петлей гистерезиса, а время выхода в РГН составляет по данным [5] 0,01–0,0115 с. В случае работы встречно параллельно соеди-

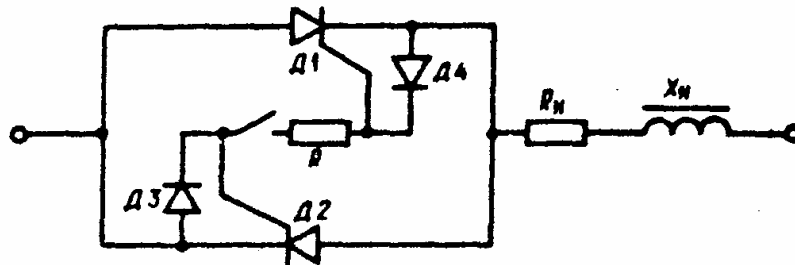


Рис. 1.

ненных тиристоров с самоуправлением РГН был достигнут при использовании в качестве нагрузки силового трансформатора с сердечником, форма петли гистерезиса которого далека от прямоугольной, а время выхода в РГН было в 40–50 раз больше указанного в работе [5].

Поскольку в магнитопроводах, не имеющих прямоугольной петли гистерезиса, значение $\Delta \Phi_{0 \min}$ обычно достаточно велико, поток в сердечнике должен "застревать" на некотором уровне внутри предельной петли гистерезиса, процесс накопления индукции прекращается [7], так как значения несимметричного входного воздействия, используемые в эксперименте, малы. Это дает основания предположить у обнаруженного эффекта иную природу, чем у известного "эффекта накопления индукции"

В схеме самоуправления ток в цепи управления до момента отпирания тиристора является одновременно и током нагрузки и изменяется по закону

$$i_y = \frac{U_m}{Z_y} \sin(\omega t - \varphi_y), \quad (2)$$

где $Z_y = \sqrt{(R_H + R + R_y)^2 + X_H^2}$; R_H и X_H — активная и индуктивная составляющие сопротивления нагрузки; R_y — сопротивление перехода управляющий электрод-катод; R — ограничительное сопротивление в цепи управления; $\varphi_y = \arcsin \frac{X_H}{Z_y}$ — фаза тока по отношению к приложенному напряжению.

В общем случае асимметрия работы вентиля определяется [3] из выражения

$$\Delta \alpha = \arcsin \frac{I_{y1} Z_y}{\sqrt{2} I_H Z_H} - \arcsin \frac{I_{y2} Z_y}{\sqrt{2} I_H Z_H}, \quad (3)$$

где I_{y1} и I_{y2} — статические токи управления тиристоров ключа.

Для оценки влияния этой асимметрии на индуктивную нагрузку со сталью представим тиристорный ключ без магнитопровода, соединенный последовательно с нагрузкой, в виде динамической системы с обратной связью (рис. 2, а). Поскольку параметры нагрузки одинаковы для положительной и отрицательной полуволн, она одинаково влияет на величину тока в цепи управляющих электродов обоих тиристоров. Нагрузка не "запоминает" несимметричный ток, протекающий в ней из-за наличия ΔI_y тиристоров. Каждый новый полупериод начинается при исходном (симметричном) состоянии нагрузки. Ток в цепи управления тиристоров протекает лишь на этом начальном, неискаженном участке, следовательно, коэффициент обратной связи по ΔI_y можно считать равным нулю, как и в случае независимого импульсного управления (см. рис. 2, а).

Магнитопровод, введенный в нагрузку (рис. 2, б), способен "запомнить" проходящий через него несимметричный поток. К началу нового полупериода параметры нагрузки остаются несимметричными, что вызывает появление в системе положительной обратной связи по ΔI_y (см. рис. 2, б). Поскольку несимметричный ток нагрузки является одновременно и током управления, то коэффициент обратной связи можно считать равным единице.

Данная система содержит динамические звенья с обобщенными передаточными функциями: $W_{Т.К}(\rho)$ — передаточная функция тиристорного ключа с самоуправлением (объекта регулирования); $W_H(\rho)$ — передаточная функция нагрузки без магнитопровода (аперiodическое звено); $W_{\mu}(\rho) = k_{\mu} / \rho$ — передаточная функция интегрирующего звена (магнитопровода); k_{μ} — постоянная времени интегрирования; $\Delta I_y(\rho)$ — возмущающее воздействие (разность статических токов управления тиристоров пары); $\rho = d/dt$ — оператор дифференцирования.

Запишем в операторной форме уравнения для отдельных звеньев:

$$\Delta I_H(\rho) = W_T(\rho) \Delta F(\rho) = W_{Т.К}(\rho) W_H(\rho) \frac{k_{\mu}}{\rho} \Delta F(\rho); \quad (4)$$

$$\Delta F(\rho) = \Delta I_y(\rho) + F_{D.C}(\rho); \quad (5)$$

$$F_{D.C}(\rho) = W_{D.C}(\rho) \Delta I_H(\rho). \quad (6)$$

Подставив уравнения (5) и (6) в (4), получим

$$\Delta I_H(\rho) = W_{Т.К}(\rho) W_H(\rho) \frac{k_{\mu}}{\rho} [\Delta I_y(\rho) + W_{D.C}(\rho) \Delta I_H(\rho)], \quad (7)$$

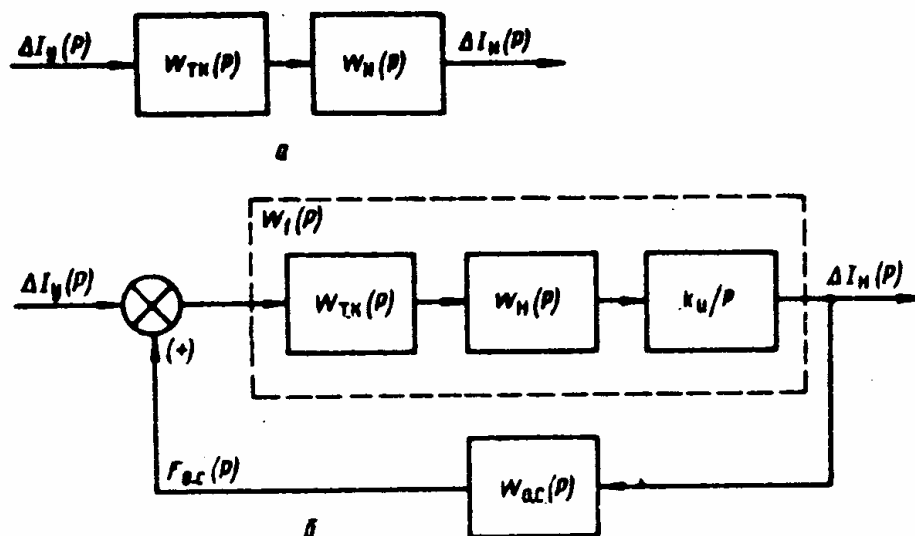


Рис. 2.

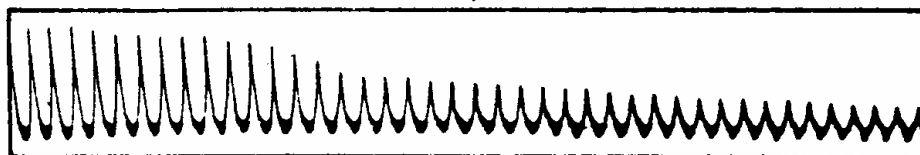


Рис. 3.

откуда, используя известные преобразования [6], имеем

$$\Delta I_H = \frac{W_{TK}(p) W_H(p) k_u / p}{1 - W_{TK}(p) W_H(p) k_u / p W_{OC}(p)} \Delta I_y \quad (8)$$

Поскольку в данной системе $W_{OC}(p) = 1$, то

$$\Phi_{OC} = W_{TK}(p) W_H(p) k_u / p W_{OC}(p) = W_f(p) \quad (9)$$

При наличии положительной обратной связи значение передаточного коэффициента системы $W(p)$ увеличивается уже при $W_f(p) < 1$. Если $W_f(p) \rightarrow 1$, то $W(p) \rightarrow \infty$, и система находится на границе устойчивости. Если же $W_f(p) > 1$, то глубина обратной связи (знаменатель в выражении (8)) получит отрицательный знак и система окажется в режиме самовозбуждения [6].

Условие устойчивости системы

$$W_{TK}(p)W_H(p)k_H/p < 1, \quad (10)$$

на практике не выполняется, поскольку отдельные составляющие левой части неравенства (10) обычно больше единицы.

Таким образом, появление в системе интегрирующего звена (магнитопровода) и обусловленной им положительной обратной связи приводит к нарушению устойчивости и самовозбуждению системы, чем и объясняется возникновение РГН при исчезающе малом значении возму-

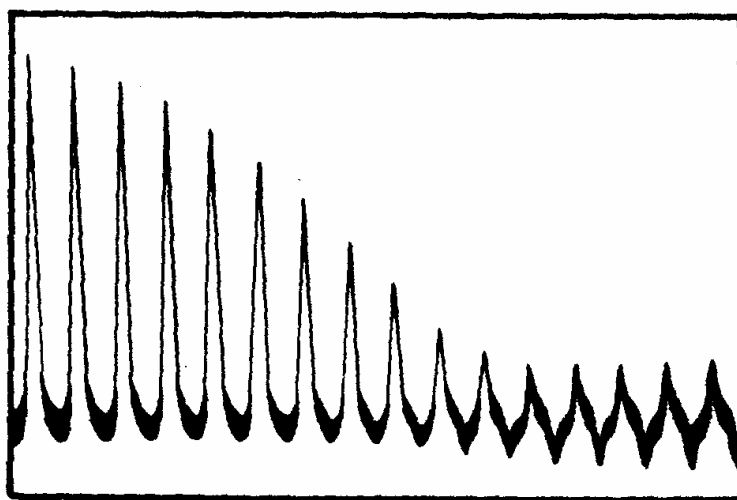


Рис. 4.

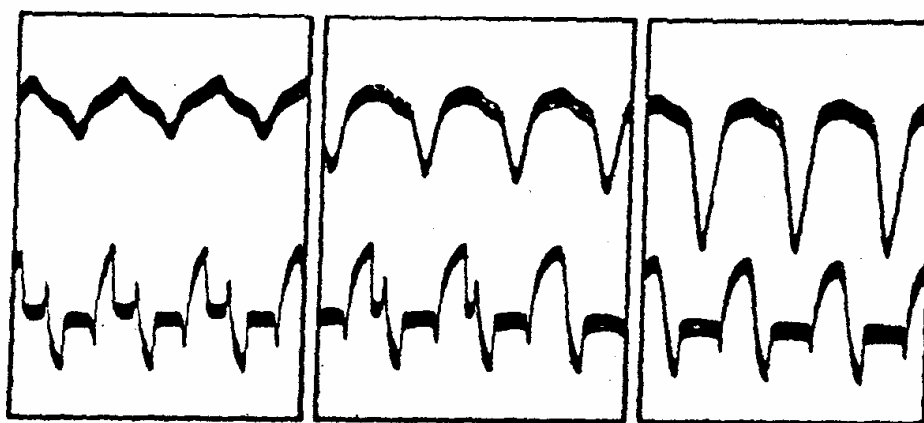


Рис. 5.

шающего воздействия $\Delta I_y > \Delta I_{y \text{ мин}}$ (рис. 3), т.е. имеет место триггерный эффект, при котором система может находиться только в двух крайних состояниях.

Поскольку скорость изменения выходной величины ΔI_H интегрирующего звена пропорциональна скорости изменения входной величины ΔI_y , можно ожидать, что время выхода в режим РГН будет резко уменьшаться с увеличением несимметрии тиристорov. Это предположение подтверждается осциллограммой тока нагрузке при выходе в РГН (рис. 4). Учитывая, что в реальных условиях магнитопровод может иметь остаточную намагниченность до включения тиристорного ключа или приобрести одностороннюю намагниченность в момент включения, из-за наличия положительной обратной связи можно ожидать нарушение устойчивости системы даже при отсутствии возмущающего воздействия ($\Delta I_y = 0$). В этом случае слабо несимметричный ток нагрузки (верхняя осциллограмма рис. 5) попадает на вход системы и вызывает несимметрию импульсов управления тиристорov (нижняя осциллограмма рис. 5), что в свою очередь приводит к усилению односторонней намагниченности магнитопровода и т.д. до выхода в режим РГН.

Чрезвычайная неустойчивость системы и возможность самовозбуждения даже при отсутствии разброса статических токов управления тиристорov требуют принятия специальных мер. Например, при работе тиристорного ключа с самоуправлением в цепи первичной обмотки трансформатора при выходе последнего в режим холостого хода тиристорный ключ целесообразно зашунтировать контактным аппаратом, рассчитанным на ток холостого хода.

1. *Поскробко А. А., Братолобов В. Б.* Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе. — М.: Энергия, 1972.—192 с.
2. *Гуревич В. И., Савченко П. И., Балахонов А. М.* Управление тиристорами переключателя ответвлений силового трансформатора. — *Электротехника*, 1980, № 7, с. 28–31.
3. *Гуревич В. И., Покатаев А. И., Савченко П. И.* Исследование работы встречно-параллельно включенных тиристорov с самоуправлением. — *Техническая электродинамика*, 1982, № 1, с. 39–43.