УДК 621.317.733

DOI: 10.53297/18293328-2021.1-70

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКОЙ С ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

М.З. Акопян

Национальный политехнический университет Армении

Рассматриваются варианты схем управления нагрузкой переменного тока, которые широко используются в системах автоматического управления. В указанных схемах в случае, когда нагрузка подключена к цепи переменного тока, часто возникает проблема переключения.

Учитывая актуальность проблемы управления нагрузкой, подключенной к сети переменного тока, целесообразно использовать схемы переключения, в которых для коммутации используются высоковольтные диоды, транзисторы, тиристоры, симисторы, оптоотиристоры и оптосимисторы.

Показаны преимущества и недостатки каждой из этих схем.

Выявлено, что одним из элементов системы автоматического управления является схема с использованием так называемого реле с “герметичным корпусом”, которое представляет собой специализированный оптрон, т.е. светодиод, который открывается двунаправленным ключом, собранным на полевых транзисторах.

Реле с “герметичным корпусом” рассчитаны на небольшие токи и иногда могут использоваться для коммутации диагоналей мостовых диодов, вследствие чего в несколько раз уменьшаются их размеры.

Часто в промышленных устройствах встречаются схемы, в которых используются оптоотиристоры и оптосимисторы. В некоторых случаях в коммутационных схемах используют обычные симисторы, управляемые динисторами или другими оптронами.

Учитывая актуальность проблемы управления нагрузкой, которая подключена к сети переменного тока, а также недостатки вышеуказанных методов, некоторые производители выпускают симисторы и тиристоры меньшего размера и меньшей стоимости в виде двух типов микросхем.

Хорошие динамические характеристики этих схем, низкий ток управления и небольшие размеры позволяют считать их наиболее целесообразными для применения в схемах управления нагрузкой с переменным током, кроме того, механизм коммутационных функций позволяет аналитически связать алгоритм системы управления с электромагнитными процессами силовой схемы.

Ключевые слова: переменный ток, система автоматического управления, постоянный ток, схема управления, явление переключения, нагрузка.

Введение. При создании современного автоматического оборудования нагрузка, подключённая к цепочке переменного тока, часто вызывает проблемы, связанные с переключением (коммутацией).

С такой соединённой нагрузкой могут быть различные элементы отопления и освещения, силовые пускатели, трансформаторы, двигатели и т.д. [1].

Есть довольно много относительно простых схем, которые позволяют решить эту проблему. Их можно разделить на несколько групп:

- схемы с использованием электромагнитных реле;
- схемы с переключением с помощью диодного моста;
- схемы с использованием реле с герметичным корпусом;
- схемы с использованием оптотиристоров и оптосимисторов;
- схемы с использованием оптронов;
- схемы с использованием тиристоров и симисторов,

Схемы, использующие электромагнитные реле, считаются самыми простыми и имеют множество недостатков, наиболее серьёзными из которых являются: значительное время включения-выключения, которое не позволяет использовать их в импульсных схемах управления, вибрация точек соприкосновения (контактов), их искрение и горение (опаливание), наличие относительно небольших ресурсов, малая распространённость реле малых размеров, возможность переключения при больших токах, содержание дорогих металлов в точках контакта и высокая стоимость реле [1]. В настоящее время схемы с электромагнитными реле считаются морально устаревшими и используются редко.

Схемы коммутационного диодного моста имеют широкое применение, особенно в системах автоматического управления.

Предполагалось, что во всех схемах идеализированных выпрямителей коммутация (переключение) тока с одного диода на другой происходит мгновенно. На самом деле из-за наличия индуктивности в цепях переключения мгновенная передача тока между диодами невозможна. Она происходит за определённый период времени, который в угловом измерении называют углом переключения (коммутации) (γ):

$$\gamma = \omega t_K,$$

где t_K — время переключения.

Явление коммутации значительно влияет на события, происходящие в выпрямителе. Вследствие этого меняются напряжения и токи в схеме, гармонические составы выпрямленного и потребляемого из сети тока, а также внешние и регулирующие характеристики. Явление коммутации влияет также на

расчётные выражения схемы, причём при высоких мощностях это влияние более ярко отражается на нагрузке.

Для коммутации диодного моста используются мощные транзисторы высокого напряжения или тиристоры. На рис. 1 а и б показаны типовые схемы коммутации диодным мостом с помощью транзистора и тиристора соответственно [2, 3].

Диоды, работая диагональными парами, соединяют к нагрузке в каждом полупериоде источник напряжения $u(t) = u_m \sin \omega t$ с той или иной полярностью. В результате напряжение на нагрузке будет односторонне пульсирующим.

Рис. 1. Типовая схема диодного моста, осуществляющего коммутацию с помощью транзистора и тиристора

Постановка задачи и методы исследования. Согласно рис. 1, можно использовать одну коммутационную функцию, определённую следующим образом:

$$f_{\Phi} = \begin{cases} +1, & \text{если открыты диоды Д1 и Д3,} \\ -1, & \text{если открыты диоды Д2 и Д4.} \end{cases}$$

Коммутационная функция f_{Φ} представляет симметричную двухполюсную прямоугольную импульсную функцию с единичной амплитудой, для которой ряд Фурье выглядит следующим образом:

$$f_{\Phi}(t) = \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \dots \right).$$

Используя функцию $f_{\Phi}(t)$, напряжение $U_{\text{наг}}$ можно представить в виде произведения функций $u(t)$ и $f_{\Phi}(t)$, т. е.

$$U_{\text{наг}} = U f_{\Phi} = \frac{4U_m}{\pi} \left[\sin^2 \omega t + \frac{\sin \omega t * \sin 3 \omega t}{3} + \frac{\sin \omega t * \sin 5 \omega t}{5} + \dots \right].$$

Произведя следующие преобразования:

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t, \quad \sin \omega t * \sin 3\omega t = \frac{1}{2} \cos 2\omega t - \frac{1}{2} \cos 4\omega t,$$

$$\sin \omega t * \sin 5\omega t = \frac{1}{2} \cos 4\omega t - \frac{1}{2} \cos 6\omega t,$$

окончательно получим

$$U_{\text{наг}} = \frac{4U_m}{\pi} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{6} \cos 2\omega t - \frac{1}{6} \cos 4\omega t + \dots \right] =$$

$$= \frac{2U_m}{\pi} \left[1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \dots \right].$$

В зависимости от требуемой точности расчёта, можно ограничиться соответствующим количеством членов. Механизм переключения функций позволяет аналитически связать алгоритм системы управления с электромагнитными процессами силовой схемы.

В приведённых схемах в качестве недостатка следует отметить гальваническую связь схемы управления с напряжением сети. При этом необходимо иметь изолированный (автономный или выделенный) источник питания, чтобы обеспечить высокую безопасность при регулировании и эксплуатации. Следующим недостатком является то, что схема имеет очень большое количество элементов, а также пять мощных элементов (четыре диода и транзистор или тиристор), которые при больших нагрузках имеют высокую температуру и нуждаются в охлаждении.

Результаты исследования. Одним из элементов системы автоматического управления является схема с использованием так называемого реле с “герметичным корпусом”, которое представляет собой специализированный оптрон, т.е. светодиод, который открывается двунаправленным ключом, собранным на полевых транзисторах.

Реле с “герметичным корпусом” рассчитаны на небольшие токи (до 1 А) (рис. 2) и иногда могут использоваться для коммутации диагоналей мостовых диодов, вследствие чего в несколько раз уменьшаются их размеры.

Рис. 2. Типовая схема моста с диодной коммутацией с помощью реле с “герметичным корпусом”

Реле с “герметичным корпусом” большой точности могут использоваться для прямой коммутации нагрузки, но из-за очень высокой стоимости их используют в исключительных случаях.

Часто в промышленных устройствах встречаются схемы, в которых используются оптотиристоры и оптосимисторы.

Оптотиристоры и оптосимисторы очень удобны для эксплуатации высокоточных устройств. На рис. 3а показана типовая схема соединения оптосимистора, а на рис. 3б - схема с двумя встречно-параллельными оптотиристорами.

Рис. 3. Типовая схема соединения оптосимистора (а), схема с двумя встречно-параллельными оптотиристорами (б)

Указанные схемы имеют три серьёзных недостатка.

а) указанные полупроводниковые приборы имеют мощные световые диоды, для открытия которых требуется большой ток, равный приблизительно 220...300 мА. Поэтому в схемах используются мощные транзисторные ключи;

б) описываемые устройства недостаточно стабильны и открываются даже из-за небольших блуждающих напряжений или токов, что заставляет исследователей открывать их не потенциалом, а изменением импульсов, что, в свою очередь, усложняет схему, делая её более дорогой;

в) поскольку оптосимисторы очень дорогие, то себестоимость схемы высокая.

Некоторые исследователи используют в коммутационных схемах обычные симисторы, управляемые динисторами или другими оптронами. Недостатком таких схем является то, что необходимо обеспечить для разных полувольт значения, близкие к углам открывания, а также требуется большое количество элементов.

Схемы с использованием тиристоров и симисторов. Учитывая актуальность проблемы управления нагрузкой, которая подключена к сети переменного тока, а также недостатки вышеуказанных методов, некоторые производители выпускают симисторы и тиристоры меньшего размера и меньшей стоимости - в виде двух типов микросхем.

Микросхемы первого типа со случайным подключением имеют светодиод и оптосимистор, предназначенные для схем управления нагрузкой на большой скорости и имеющие широкополосную импульсную модуляцию. В момент включения мощного симисторного (тиристорного) соединения такие схемы создают большие импульсные отклонения и требуют применения эффективных сетевых фильтров.

Микросхемы второго типа, связанные с переключением фаз, включают светодиод и симистор, предназначенные для использования в медленных коммутаторах с низким уровнем шума, в которых мощные симисторы (тиристоры) включаются при небольших напряжениях (близких к нулю) и не создают больших препятствий.

Эти микросхемы, имеющие номера и заканчивающиеся на 1,2 и 3, обеспечивают подключение к нагрузке, когда на светодиоды подаётся ток, равный 15, 10 и 5 мА. Типовая схема соединения при управлении мощными симисторами представлена на рис. 4а, а случай с двумя встречно-параллельными тиристорами - на рис. 4б.

Рис. 4. Схемы подключения для случая управления: а - мощным симистором, б - двумя тиристорами

Приведённые на рисунках RC - цепи, которые параллельно соединены с симисторами (тиристорами), рекомендуются для улучшения динамических

характеристик симисторов и тиристоров. При этом малому значению резисторов соответствует активная нагрузка, а большому значению - индуктивная нагрузка.

Заключение. Таким образом, хорошие динамические характеристики этих схем, низкий ток управления и небольшие размеры позволяют считать их наиболее целесообразными для применения в схемах управления нагрузкой с переменным током, кроме того, механизм коммутационных функций позволяет аналитически связать алгоритм системы управления с электромагнитными процессами силовой схемы.

Литература

1. **Բարեղամյան Գ.Վ.** Ուժային էլեկտրոնիկայի հիմունքներ /Ուսումնական ձեռնարկ. – Երևան: ՀՊՃՀ, 2011. - 135 էջ:
2. **Келим Ю.М.** Типовые элементы систем автоматического управления. – М.: "ИНФРА", 2002. – 384с.
3. **Воронин П.А.** Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. -М.: Изд. дом "ДОДЭКА-ХХІ", 2005.- 384 с.

*Поступила в редакцию 13.05.2021.
Принята к опубликованию 15.07.2021.*

ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ՀՈՍԱՆՔՈՎ ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՍԽԵՄԱՆ

Մ.Զ. Հակոբյան

Դիտարկվում են ավտոմատ կառավարման համակարգերում լայն կիրառում գտած փոփոխական հոսանքով բեռնվածքի կառավարման սխեմաների տարբերակների հետազոտումը: Փոփոխական հոսանքով բեռնվածքի կառավարման սխեմաներում բեռը, միացված լինելով փոփոխական հոսանքի շղթային, հաճախ առաջացնում է փոխանջատման (կոմուտացիայի) խնդիր:

Հաշվի առնելով բեռնվածքի կառավարման հիմնախնդրի արդիականությունը, որը միացած է փոփոխական հոսանքի ցանցին, սխեմաներում նպատակահարմար է կիրառել կոմուտացիոն սխեմաներ, որոնցում կոմուտացիայի համար օգտագործվում են բարձր լարման հզոր դիոդներ, տրանզիստորներ, տիրիստորներ, սիմիստորներ, օպտո-տիրիստորներ և օպտոսիմիստորներ:

Հոդվածում ներկայացված են դիտարկված կառավարման սխեմաներից յուրաքանչյուրի առավելություններն ու թերությունները:

Ցույց է տրված, որ ավտոմատ կառավարման համակարգի տարրերից մեկը մի սխեմա է, որն օգտագործում է այսպես կոչված «հերմետիկ պատյանով» ռելե, որն իրենից

ներկայացնում է մասնագիտացված օպտրոն, այսինքն՝ լուսադիոդ: Լուսադիոդը բացվում է երկկողմանի բանալիով, որը հավաքված է դաշտային տրանզիստորների վրա:

«Հերմետիկ պատյանով» ռելեները նախատեսված են փոքր հոսանքների համար: Դրանք երբեմն կարող են օգտագործվել կամրջային դիոդների անկյունագծերը փոխանջատելու համար, որի շնորհիվ այդ սխեմայի չափսերը մի քանի անգամ կրճատվում են:

Հաճախ արդյունաբերական սարքերում կարելի է հանդիպել այնպիսի սխեմաների, որոնցում օգտագործվում են օպտոտիրիստորներ և օպտոսիմիստորներ: Որոշ դեպքերում, այդ փոխանջատման սխեմաներում օգտագործվում են սովորական սիմիստորներ, որոնք ղեկավարվում են դինիստորներով կամ այլ օպտրոնների միջոցով:

Հաշվի առնելով փոփոխական հոսանքի ցանցին միացված սխեմաների բեռնվածքի կառավարման խնդրի արդիական լինելը, ինչպես նաև կառավարման շղթաների չափսերի և գնի նկատմամբ ներկայացվող պահանջները, առաջարկվում է դրանք ներկայացնել երկու տիպի միկրոսխեմայով:

Այդ միկրոսխեմաների լավ դինամիկ բնութագրերը, փոքր չափսերը և կառավարման ցածր հոսանքը թույլ են տալիս դրանք համարել ամենահարմար՝ փոփոխական հոսանքով բեռի կառավարման շղթաներում օգտագործելու համար:

Բացի դրանից, փոխանջատման ֆունկցիա իրականացնող մեխանիզմը թույլ է տալիս գործնականում միմյանց կապել կառավարման գործընթացը, ուժային սխեմաների էլեկտրամագնիսական գործընթացների հետ:

Առանցքային բառեր. փոփոխական հոսանք, ավտոմատ կառավարման համակարգ, հաստատուն հոսանք, կառավարման սխեմա, փոխանջատման երևույթ, բեռ:

AN AC LOAD CONTROL DIAGRAM

M.Z. Hakobyan

Variants of alternating current load control schemes widely used in automatic control systems are considered. In AC load control circuits, when the load is connected to the AC network, there is often a switching problem.

Taking into account the urgency of the problem of controlling the load, which is connected to the AC network, it is advisable to use switching circuits in which high-voltage diodes, transistors, thyristors, triacs, optothyristors and optosimistors are used for switching.

The advantages and disadvantages of each of these schemes are shown.

It is revealed that one of the elements of the automatic control system is a circuit using a so-called relay with a “sealed housing”, which is a specialized optical coupler, i.e. a LED that opens with a bidirectional key assembled on field-effect transistors.

Relays with a “sealed housing” are designed for small currents and can sometimes be used to switch the diagonals of bridge diodes, as a result of which their dimensions are reduced several times.

Often in industrial devices there are schemes in which optothyristors and optosymistors are used. In some cases, conventional triacs controlled by dinistors or other optocouplers are used in switching circuits.

Taking into account the urgency of the problem of controlling the load that is connected to the AC network, as well as the disadvantages of the above-mentioned methods, some manufacturers produce triacs and thyristors of smaller size and lower cost - in the form of two types of chips.

The good dynamic characteristics of these circuits, low control current and small size allow to consider them the most appropriate for use in load control circuits with alternating current, in addition, the mechanism of switching functions allows to analytically link the control system algorithm with the electromagnetic processes of the power circuit.

Keywords: alternating current, automatic control system, direct current, control circuit, switching event, load.