

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА МОЩНОСТНИ ПРЕВКЛЮЧВАТЕЛИ С ТИРИСТОРИ ЗА СЪПАЛНИ РЕГУЛАТОРИ НА НАПРЕЖЕНИЕ

Тони Драгомиров, Николай Гуров

Резюме: В статията са разгледани различни електрически схеми на мощностни превключватели с тиристори за съпални регулатори на напрежение. Анализирани са предимствата и недостатъците им. Разработени са контактни системи на мощностни превключватели, които да гарантират надеждна работа на тиристорните блокове. Направени са препоръки за оптимален конструктивен вариант на мощностен превключвател с тиристори.

Ключови думи: тиристор, мощностен превключвател, съпален регулатор на напрежение, анализ

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF TYRISTOR ASSISTED DIVERTER SWITCHES FOR ON-LOAD TAP CHANGERS

Toni Dragomirov, Nikolay Gourov

Abstract: The paper dealt with various electrical circuits of thyristor assisted diverter switches for on-load tap changers. Their advantages and disadvantages are analyzed. Contact systems of diverter switches are developed to ensure the reliable operation of thyristor blocks. Recommendations are made for optimal variant of construction of thyristor assisted diverter switch.

Keywords: thyristor, diverter switch, on-load tap changer, analysis

1. Въведение

Номиналното напрежение на електрическата мрежа е един от основните показатели на качеството на електрическата енергия. За неговото регулиране под товар широко се използват съпални регулатори. При използването на тези устройства за регулиране се превключват отклонения на намотките на трансформатор, чрез което се променя преводното му отношение за да се запази постоянно изходното му напрежение. Превключването се осъществява без да се изключва трансформаторът от мрежата и без да се прекъсва електрическото захранване на консуматорите. В класическите съпални регулатори превключването под товар се осъществява посредством механични контакти, като по време на процеса на прехвърляне на работния ток от работещото към съседното отклонение се запалва електрическа дъга. Това води до образуване на нагар по контактните повърхности, замърсяване на трансформаторното масло на трансформатора и електрическо износване на контактите, а с това и до рязко намаляване на интер-

валите за техническо обслужване на трансформаторите със стъпални регулатори на напрежението в сравнение с тези без стъпални регулатори.

Целта на изследванията в тази област е да се удължи интервалът между изключванията за поддръжка и ремонт на стъпалните регулатори (при което се изключват и съответните трансформатори) и този интервал да се доближи и дори изравни с интервала за поддръжка и ремонт на трансформаторите без стъпални регулатори. В този случай поддръжката и ремонта на стъпалния регулатор ще става по време на съответните дейности по трансформатора и ще се намали цената на поддръжката и изключванията за ремонт.

Като едно решение на посочените проблеми се предлагат схеми, които използват тиристорни превключващи елементи. При този вид стъпални регулатори превключването на работния ток между две съседни отклонения става за кратко време при преминаването му през нулевата стойност и е бездъгово. На практика обаче при схемите, които използват само тиристорни контакти възникват много технически и икономически проблеми свързани с работата на сложните и чувствителни електронни системи в загрято трансформаторно масло, както и все още високата цена на електронните схеми и тиристорите. Като допълнителен недостатък трябва да се отбележи недостатъчната надеждност и недопустимо големи загуби на предлаганите на пазара тиристори.

Поради тези причини в практиката са се наложили хибридни стъпални регулатори, които използват основни класически механични контакти за постоянна връзка между съответното отклонение на трансформатора и консуматора и спомагателни тиристорни групи, които се включват за кратко по време на процеса на превключване на отклоненията и осигуряват бездъгово превключване.

2. Мощностни превключватели с тиристори за стъпални регулатори на напрежение

В началото на шестдесетте години на двадесети век Сименс разработи мощностен превключвател с тиристори за стъпален регулатор на напрежение [1]. Той е приложен в трансформатори за електрически локомотиви на фирмата Трансформаторен Юнион. На фиг.1.а [2] е показана електрическата схема на този мощностен превключвател.

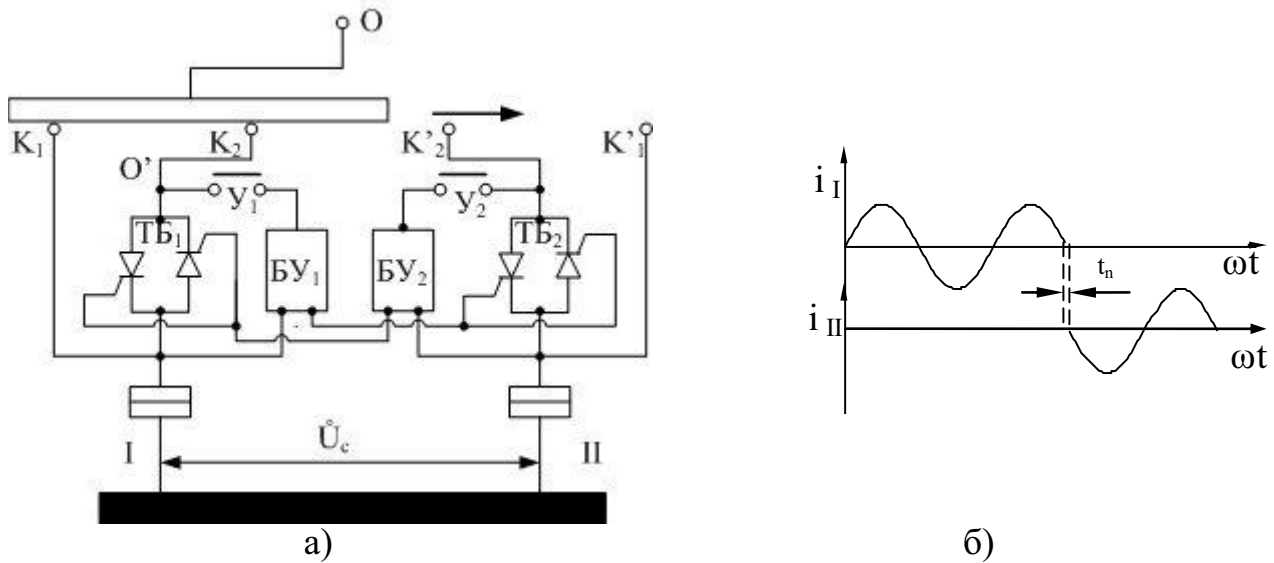
Основните структурни елементи на мощностния превключвател (МП) са:

- Два тиристорни блока TB_1 и TB_2 съставени от по два антипаралелно включени тиристора;
- Два управляващи блока $БУ_1$ и $БУ_2$ с управляващи контакти $У_1$ и $У_2$;
- Механична контактна система (K_1, K_2, K_2' и K_1');

Като предимства на този МП се изтъкват:

- Бездъгово превключване с голям комутационен ресурс без да се замърсява средата, в която е разположен МП;

- Не се използват токоограничаващи резистори или реактори. Прехвърлянето на тока от работещото отклонение (I) към избраното отклонение (II) става при преминаването му през нулева стойност (фиг.1.б)).



Фиг.1

От описанието на конструкцията на разглеждания МП в [3] става ясно, че той е разположен във въздух, върху проходен изолатор. Контактната система не защитава от токове на късо съединение и са предвидени предпазители.

Тази конструкция не отговаря на съвременните изисквания.

След този начален период са правени и други конструкции на тиристорни МП, но постепенно те са изместени от МП с вакуумни дългогасителни камери (ВДК).

За да се търси конкурентноспособна конструкция на МП с тиристори тук ще се разгледат следните въпроси:

- Структурен анализ на МП с тиристори и търсене на оптимална структура. Като начални насоки ще се използват [4] и [5].
- Разработване на контактни системи, които да гарантират надеждна работа на тиристорните блокове. Досега няма известно описание на съвременни механични контактни системи за тиристорни МП.

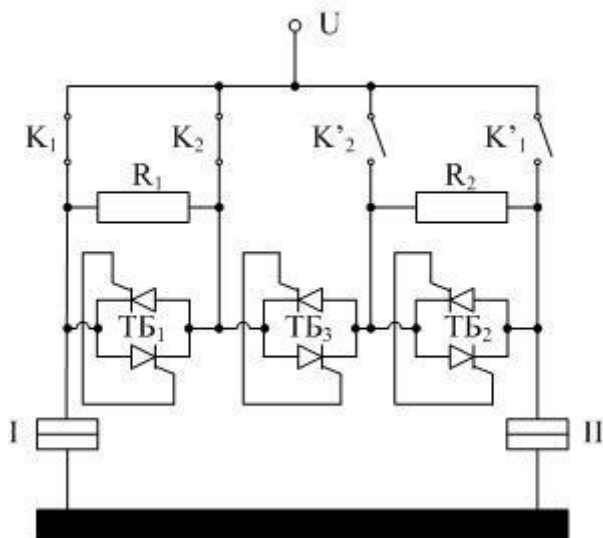
При работа на тиристорните МП трябва да бъде обърнато внимание на някои експлоатационни ограничителни условия, които не са налице при МП с ВДК. Такива са:

- Съгласно международният стандарт IEC 60214-1; 2014 стъпалният регулатор трябва да издържи ток на термическа устойчивост за 2 s равен на десет пъти номиналния ток. Например за номинален ток 1000 А това са 10 кА. Токът на динамическа устойчивост трябва да е съответно 25 кА. Такова натоварване не е допустимо за тиристорите, поради което се налага да има паралелни механични контактни системи.
- МП трябва да издържа експлоатационни пренапрежения от порядъка на 120 кV импулсно и 35 кV за една минута при промишлена честота. Защитата на тиристорите също трябва да се осигури от контактната система.

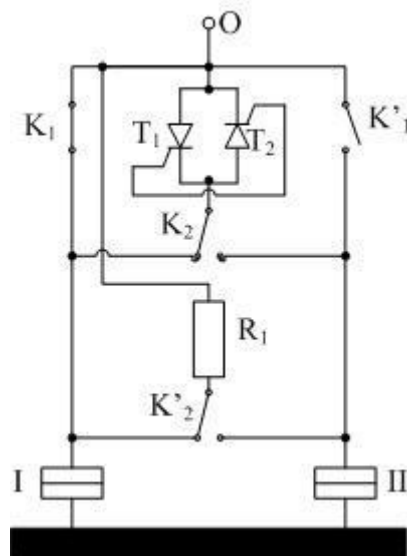
- МП, съгласно стандарта, трябва да може да превключва при околна температура на горещото трансформаторно масло 115°C . Това значително ограничава претоварващата възможност на тиристорите.

Оптимален конструктивен вариант на МП с тиристори се търси, като се използват минимален брой основни структурни единици и контактна система съобразена с ограничителните условия.

Първо ще се анализира дали няма по-добър вариант с друг брой тиристори.



Фиг.2



Фиг.3

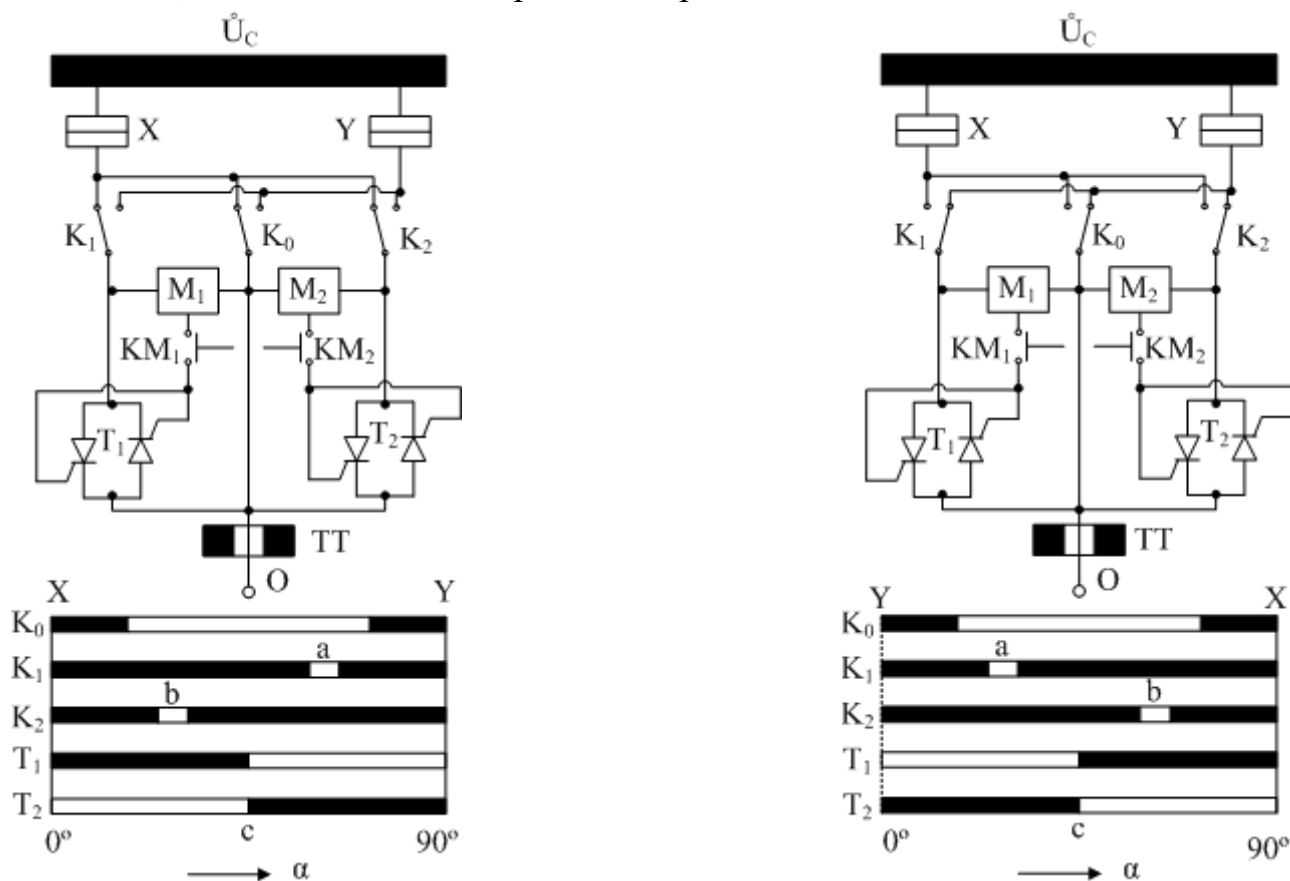
На фиг.2 е представен вариант на МП с три блока тиристори. Той е приложен в класическа конструкция за дъгогасене в масло. Анализът показва, че този вариант не е конкурентноспособен, защото конструкцията е сложна и скъпа.

Схемата от фиг.3 е само с един тиристорен блок, поради което се получава покомпактна и евтина конструкция. Тук обаче контактен възел K_2' включва по време на протичане на циркулиращ ток. При това се получава електрическа ерозия поради вибрациите при включване, като износването на контактните елементи може да е значително. Следователно не се осигурява бездъгово превключване, което прави този по-икономичен вариант неприемлив за практическо приложение.

Изводът е, че оптималният вариант е задължително да има два тиристорни блока. По отношение на управляващите блокове има два варианта [4], [5] – с два управляващи блока и с един управляващ блок.

Тук последователността на превключване е представена чрез циклограми. Това позволява да се синтезира подходяща контактна система, която да се приложи в конкретен МП. На Фиг. 4 е дадена схема с два тиристорни блока, T_1 и T_2 , два управляващи модула M_1 и M_2 с управляващи контакти K_{M1} и K_{M2} и контактна система. Тя се състои от главен контактен възел K_0 , който поема токовете на късо съединение и два спомагателни контактни възела K_1 и K_2 свързани последователно съответно на T_1 и T_2 . Контактните възли K_0 , K_1 и K_2 са присъединени към две съседни отклонения X и Y на стъпалната намотка. Между X и Y е приложено стъпалното напрежение U_c . Разтворите на K_0 , K_1 и K_2 осигуряват защита

на тиристорите от пренапрежения. На фиг.4 са показани двете крайни положения на МП, които се сменят при всяко превключване.

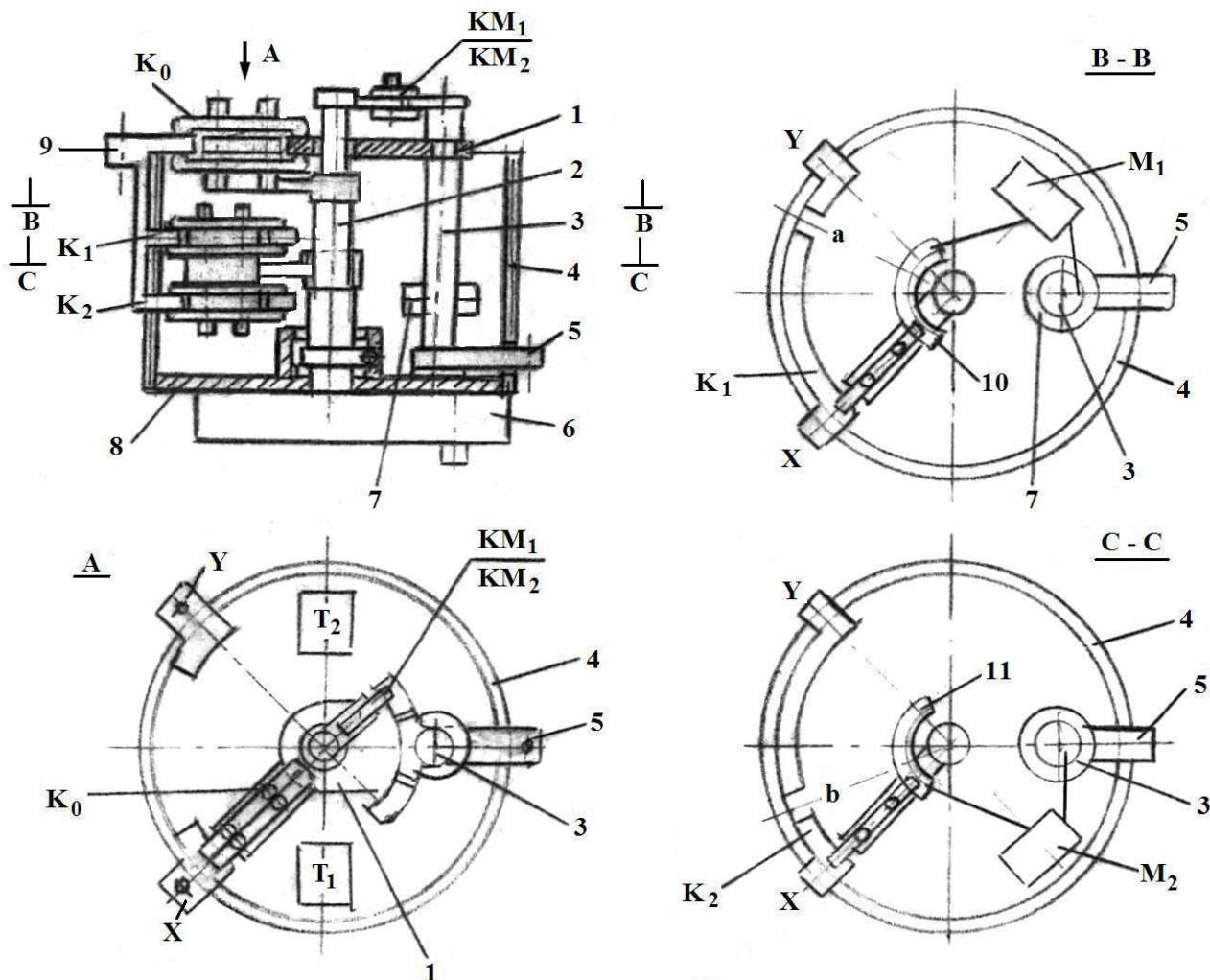


Фиг.4

Циклограмите под електрическите схеми показват кога контактните възли са затворени (потъмнените полета) и кога отворени (белите полета). K_0 се отваря в началото и затваря в края на превключването. През този период K_1 и K_2 се прехвърлят от X на Y и обратно. През периодите „a” и „b” веригите им са отворени и по този начин се избягва стъпалното късо съединение. Тиристорните групи T_1 и T_2 са отпушени (тъмните полета) или запушени (светлите полета). Прехвърлянето на тока от T_1 на T_2 и обратно става в момент „c”. Това се осъществява в рамките на 10 ms, в зависимост от момента, в който токът преминава през нулева стойност.

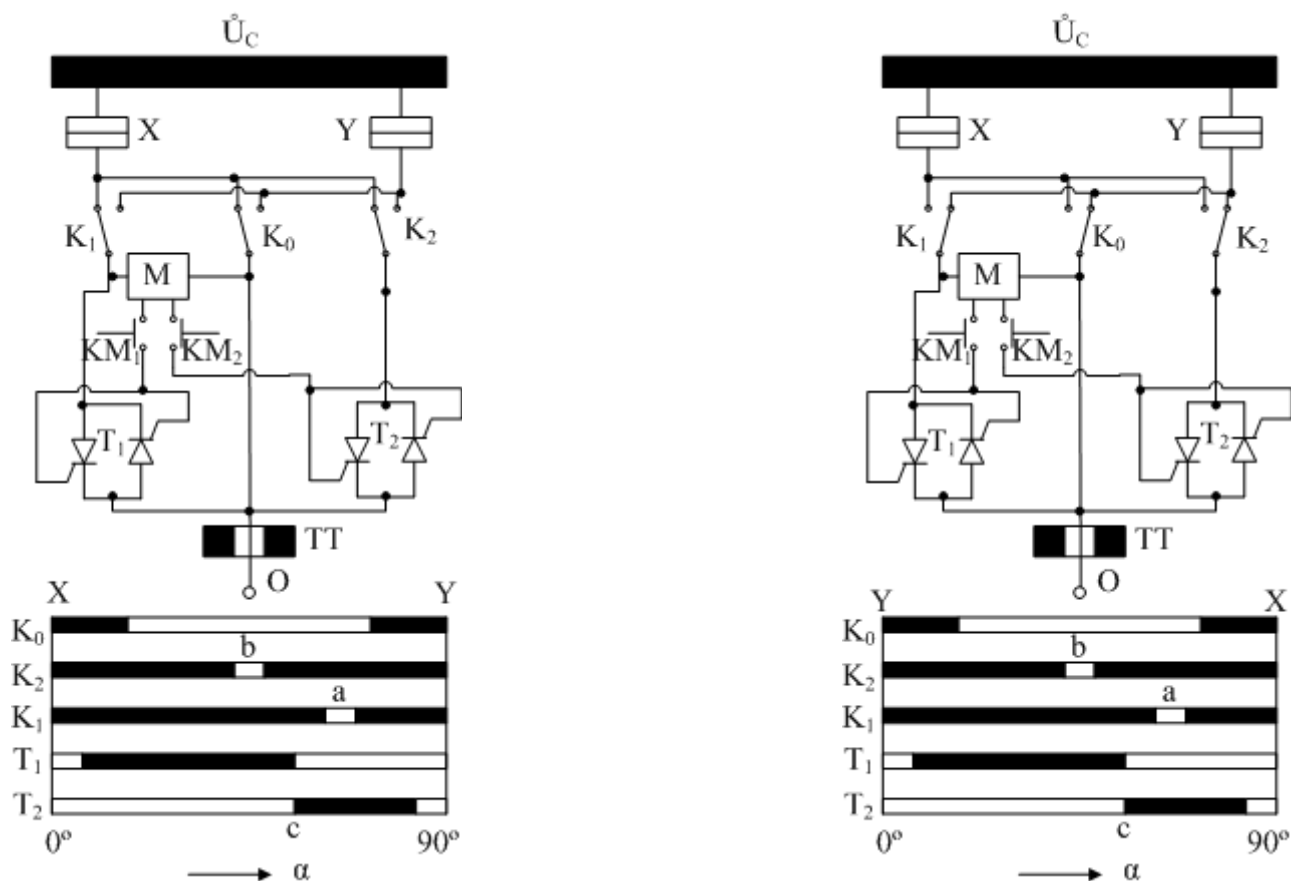
Циклограмите се реализират от МП показан на фиг.5. Той е еднофазен, като контактната система се движи на ъгъл $\alpha=90^\circ$. Носещата конструкция се състои от метално дъно 8 и цилиндър 4 от изолационен материал. В центъра на дъното 8 е лагерован задвижващ вал 2, към който са монтирани подвижните контактни елементи на K_0 , K_1 и K_2 . Неподвижните контактни елементи 9 са закрепени към цилиндъра 4 под ъгъл 90° . Към тях са свързани отклоненията X и Y на стъпалната намотка. Неподвижните контактни елементи на K_0 представляват две къси дъги, а тези на K_1 и K_2 – дълги дъги с прекъсвания „a” респективно „b”. От вътрешната страна подвижният контактен елемент K_1 е свързан с къса дъга 10, а K_2 – с къса дъга 11. Контактните дъги 10 и 11 са закрепени към дъното 8 чрез изолационни елементи. Съобразно схемите от фиг.4 дъга 10 е свързана с M_1 , а дъга 11 – с M_2 . От вътрешната си страна подвижният контактен елемент K_0 е

свързан с тоководеща планка 1, закрепена на тоководеща колона 3 с извод 5. Към колона 3 са монтирани неподвижните контактни елементи на KM_1 и KM_2 , а подвижните се въртят заедно с вал 2. Токовете трансформатори, от които се формират командите за управление на T_1 и T_2 са означени със 7 (фиг.4) [6]. Скокообразното завъртане на вал 2 от пружинно – енергийния акумулатор 6 на 90° в едната, респективно в другата посока осъществява циклограмите от фиг.4.



Фиг.5

На фиг.6 са представени електрическите схеми и циклограмите на МП с един управляващ модул М. Циклограмите са различни и се реализират от МП показан на фиг.7. Той е с аналогична конструкция на МП от фиг.5 и се отличава от него само по оформянето на K_0 , K_1 и K_2 . KM_1 и KM_2 са същите като на фиг.5. Подвижният мост на K_1 е свободно лагерован (15) на вал 2 и може да се колебае на ъгъл около 40° , който се определя от двете опори 14. Към подвижния контактен елемент на K_2 е монтирана дъга 12 с два вертикални щифта 13, които превключват K_1 през втората половина на движението. Изолационните междини „a” и „b” на K_1 и K_2 са разположени в средата на неподвижните им дъги. И в двете посоки на превключване първо се преминава изолационна междина „b”, а след това междината „a”. Преминаването и през двете изолационни междини става когато през тях не протича ток.



Фиг.6

Предимство на схемата от фиг.6 спрямо тази от фиг.4 е, че се използва само един управляващ модул. И при двете схеми прехвърлянето на работния ток от едната тиристорна група към другата става при преминаването на тока през нулева стойност.

При това възвръщащото се стъпално напрежение е дефазирано спрямо тока, поради което в някои случаи скоростта на възстановяване на напрежението върху тиристорите може да бъде значителна.

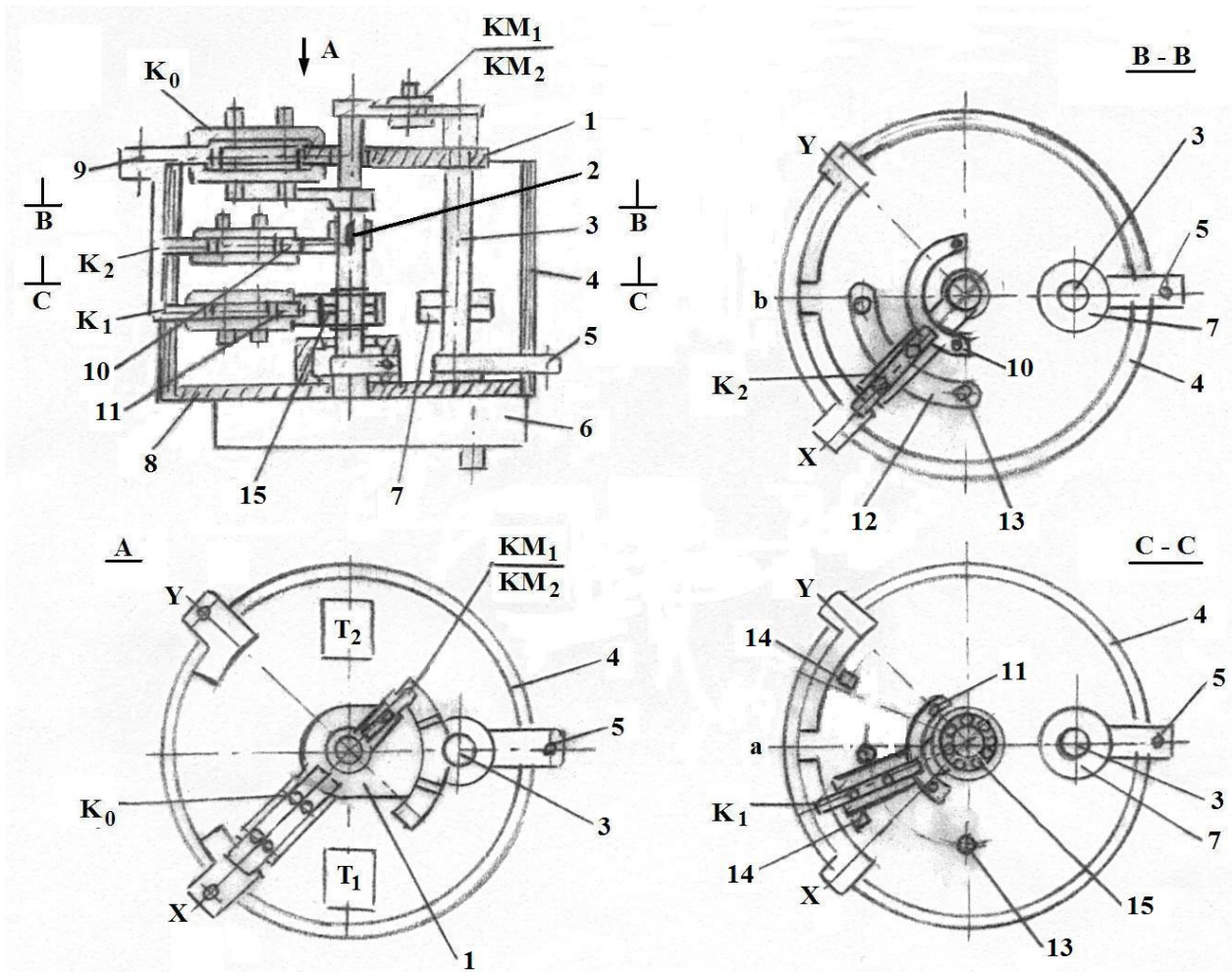
Това съответно увеличава опасността от стъпално късо съединение с тежки последици.

С по-високи надеждностни показатели е схемата на фиг.8, където последователно на T_2 е свързан резистор R . За сметка на един неголям по размери и цена резистор се избягва опасността от стъпално късо съединение.

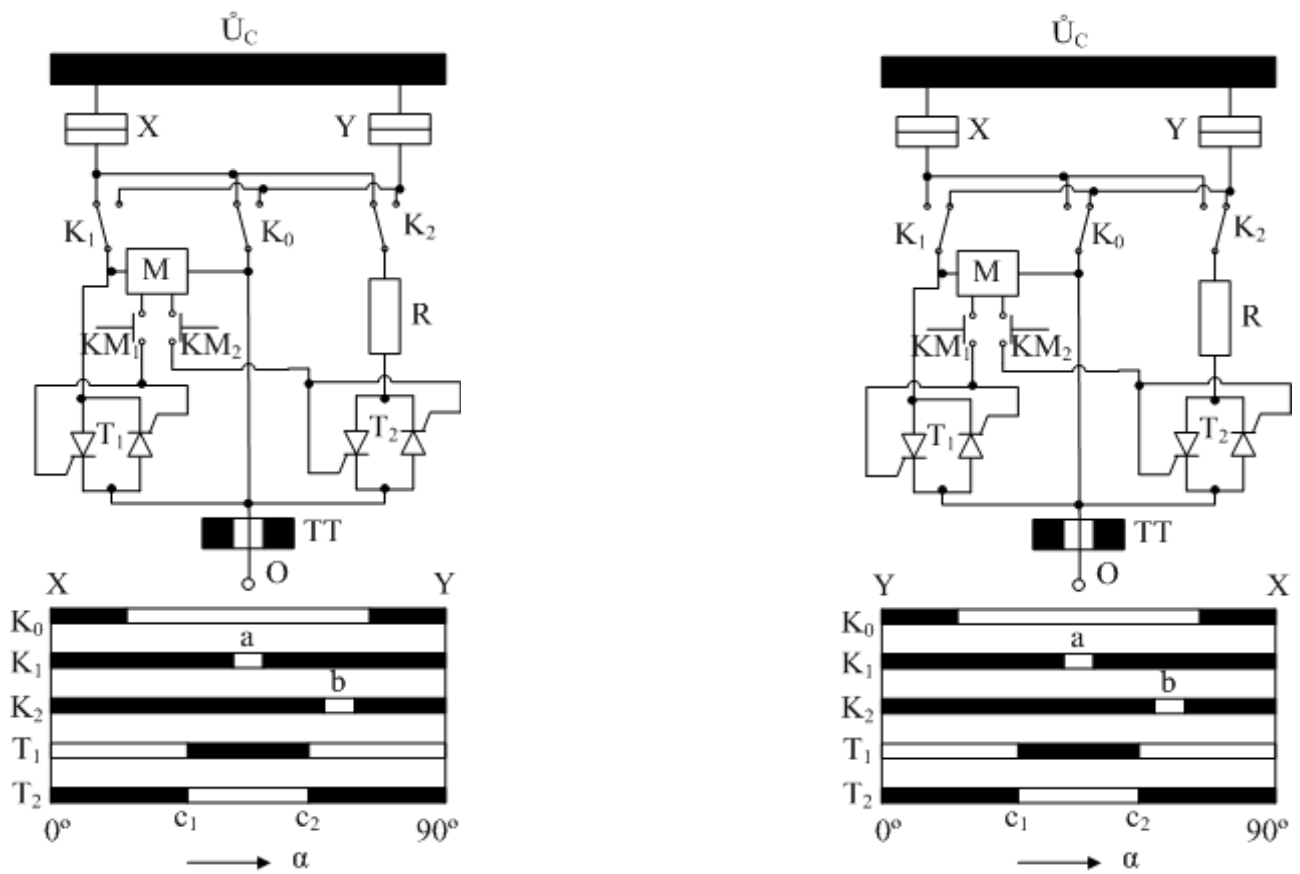
В случая тиристорните групи не превключват по-големи токове и върху тях не въздействат по-големи възстановяващи се напрежения.

Например при МП с номинален ток 1000 А, съгласно IEC 60214-1-2014, трябва да се гарантира превключване на 2000 А.

Ако стъпалното напрежение е 3000 V, за схемите от фиг.4 и фиг.6, ще е налице превключвана мощност 6 MVA. При $R=1,5 \Omega$ в схемата от фиг. 8 тиристорните групи T_1 и T_2 ще превключват поотделно 6 MVA, като условията на комутация ще са по-благоприятни.



Фиг.7



Фиг.8

Електрическите схеми и циклограмите показани на фиг.8 се реализират с МП съгласно фиг.7. Разликата от фиг.6 е, че K_1 е съгласно разрез В-В, а K_2 - съгласно разрез С-С. Така и в двете посоки първо превключва K_1 , а след това K_2 . Схемата за управление е по-различна, като първо става прехвърляне от T_1 на T_2 (точка C_1), а след това от T_2 на T_1 (точка C_2). При тази схема след затваряне на K_0 , T_1 продължава да провежда ток и двете вериги (K_0 и K_1) работят в паралел. Така се повишава номиналният ток на МП. Използването на тиристорните блокове само по време на превключването не дава възможност те да се използват ефективно.

3. Заключение

В резултат на проведения анализ могат да се направят следните изводи:

1. От трите изследвани електрически схеми оптимална е тази от Фиг. 8. Предимства са използването само на един управляващ блок, по-ефективно използване на тиристорните блокове и надеждно превключване.
2. Разработени са мощностни превключватели, които реализират и трите електрически схеми. Предимство е голямата унификация на трите варианта.

Разгледаните варианти на схеми и конструкции осигуряват защита от пренапрежения и токове на късо съединение.

Що се отнася до ограничението регламентирано за горещото трансформаторно масло са известни няколко варианта, които го елиминират:

- а) Охлаждане на маслото в съда на мощностния превключвател [7]. Това усложнява и оскъпява стъпалния регулатор.
- б) Избирачът и предизбирачът са в трансформаторното масло, а МП е изнесен странично във въздушна среда [8]. Конструкцията е усложнена, а МП има проблеми с изолационните разстояния и климатичните условия на работа.
- в) МП е поместен в съд пълен с елегаз (SF_6) [9]. Чрез малко усложнение недостатъците на вариант б) са отстранени.

Най-добрият вариант е така да се конструира и оразмери МП, че да може да работи в горещо трансформаторно масло.

Благодарност

Авторите изказват своята благодарност на Технически университет – София за подкрепата, която оказва в работата им.

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София - 2015 год.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Stein, W. Stufenschalter mit Thyristorlastumschalter für Wechselstrom – Triebfahrzeuge, Siemens – Zeitschrift, Heft 4, April, 1965
- [2] Драгомиров Т., В. Хубанов, Стъпални регулатори на напрежение, Техника, София, 1971
- [3] Порудоминский В., Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой, Энергия, Москва, 1974
- [4] Dragomirov T., N. Gourov, Semiconductor Aided On-Load Regulation of Power Transformers, International conference “Elma 2008”, Vol. 2, pp 398-401, Sofia, Bulgaria, 2008
- [5] Gourov N., Control of On-Load Tap-Changers with Thyristor Aided Diverter Switches, Internmational symposium “Siela 2009” Vol. 1, pp 114-121, Varna, Bulgaria, 2009
- [6] А.С. № 21631, кл. 21d², 53/03, България
- [7] А.С. № 14187, кл. 21d², 53/03, България
- [8] DE 10102310, H01F 29/04 – MR, Германия
- [9] Патент № 62107, H01F 29/04, България

Автори: Тони Драгомиров, проф. дтн.; Николай Гуров, гл. ас. катедра „Електроизмервателна техника“, Факултет Автоматика, Технически Университет-София, E-mail address: nrg@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.05.2015

Рецензент: доц. д-р В. Иванчева