

Тема 9. Типові релейно-контакторні схеми керування пуско-гальмівними режимами електроприводів з двигунами змінного струму

1. Схеми керування асинхронними двигунами з КЗ ротором із використанням магнітних пускачів
2. Схема керування пуском асинхронного двигуна з КЗ ротором і динамічним гальмуванням у функції часу
3. Схема керування пуском, противмиканням і динамічним гальмуванням асинхронного двигуна з КЗ ротором
4. Схема керування пуском і динамічним гальмуванням асинхронного двигуна із фазним ротором у функції часу
5. Схема керування пуском, противмиканням і динамічним гальмуванням асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу
6. Схема керування багатоступінчастим пуском асинхронного двигуна з фазним ротором

ТИПОВІ СХЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

Схеми релейно-контакторного керування асинхронними двигунами (АД) будують за тими самими принципами, що і схеми керування двигунами постійного струму.

Основна особливість схем релейно-контакторного керування асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором — це мінімальна кількість пускової апаратури і їхня простота. Короткозамкнені двигуни малої і середньої потужності, як правило, запускаються прямим вмиканням у мережу без обмеження пускових струмів. Якщо технічними умовами електричне гальмування не передбачено, то керування пусковими процесами здійснюється за допомогою магнітних пускачів, які одночасно забезпечують основні види захисту. У разі складніших вимог для керування пускогальмівними режимами асинхронних двигунів з фазовим ротором використовуються типові панелі і пульти керування. Схеми керування асинхронними двигунами з фазовим ротором мають передбачати обмеження струмів у режимах пуску, реверсу і гальмування за допомогою додаткових резисторів у колі ротора.

Керування пуску асинхронних двигунів із фазовим ротором, як правило, здійснюється у функції часу і струму ротора, режим динамічного гальмування — у функції часу, а режим противмикання — у функції ЕРС ротора.

Схеми керування асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором із використанням магнітних пускачів

Принципові схеми керування асинхронними двигунами за допомогою магнітних пускачів наведені на рис. 5.11, 5.12.

Схема рис. 5.11, *a* забезпечує тільки режим пуску. Вона містить магнітний пускач, реалізований на контакторі *KML*, і два вмонтовані в нього теплових реле *FP*. Схема дозволяє прямий пуск АД, відмикання його від мережі, а також захист від коротких замикань (запобіжниками *FU*) і перевантаження (тепловими реле *FP*).

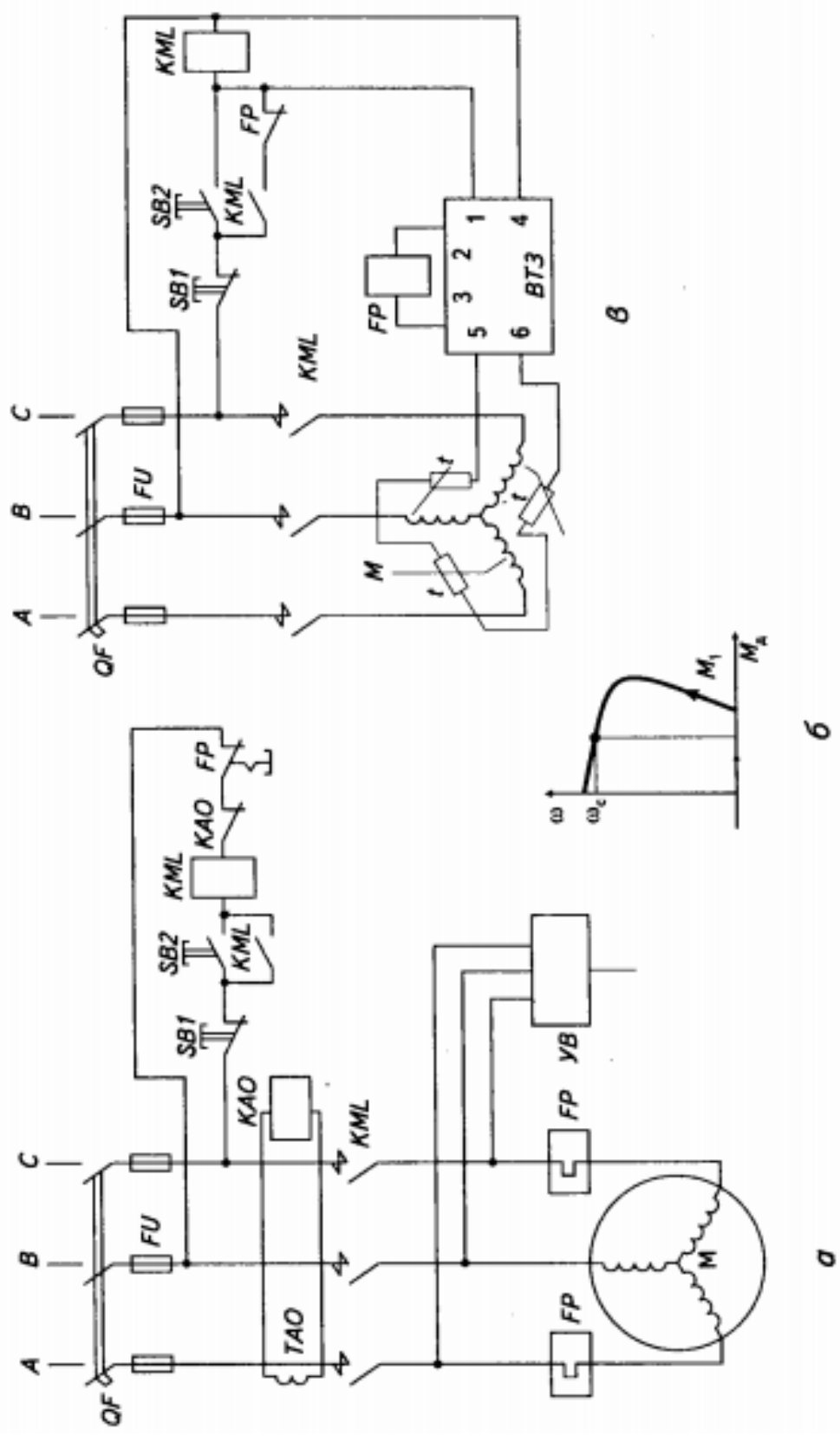


Рис. 5.11

Для пуску двигуна натискається кнопка *SB2*. При цьому одержує живлення лінійний контактор *KML*, який силовими контактами підмикає статор до джерела живлення, а блок-контактами шунтує кнопку *SB2*. Двигун розганяється на природній характеристиці (рис. 5.11, б).

Схема може бути доукомплектована: електромеханічними гальмами і захистом від неповнофазного режиму. У першому випадку в схему вмикають соленоїд *УВ* механічних гальмів; у другому — може бути використаний або трансформатор нульового струму *TA0* з виходом на реле *KA0*, або реле нульової напруги *KV0* для схем із робочим нульовим виводом.

Двигуни, що використовуються для механізмів, які працюють з істотними перенавантаженнями і частими пусками, комплектуються температурним захистом, вбудованим безпосередньо в лобових частинах обмотки статора. Для цього використовують напівпровідникові датчики температури — терморезистори (по одному в кожен фазу), з'єднані послідовно. Схему керування, що працює в комплекті з пристроєм температурного захисту *BTЗ*, який отримує сигнал від названих датчиків, підсилює його і подає на вимикання двигуна за допомогою вихідного реле *FP* за перевищення температури статора над допустимим значенням, наведено на рис. 5.11, в.

Схема рис. 5.12, а забезпечує режими пуску і реверсування швидкості двигуна. Основним елементом схеми є реверсний магнітний пускач, який містить два лінійні контактори *KMF* і *KMR*, а також реле теплового захисту *FP*.

Схема дозволяє прямий пуск і реверс АД, а також гальмування двигуна, що здійснюється накладанням механічних гальм, коли двигун вимикається з мережі. У схемі передбачено захист від перевантажень і коротких замикань.

Захист від перевантаження здійснює теплове реле *FP*, захист від короткого замикання в колі статора — автоматичний вимикач *QF*, в оперативному колі — запобіжники *FU*. Нульовий захист від втрати напруги живлення або зниження напруги нижче допустимого рівня здійснюють контактори *KMF* і *KMR*, захист від неповнофазного режиму — реле нульової напруги *KV0*.

Один із можливих варіантів вмикання контакторів *KMF* і *KMR* зображено на рис. 5.12, а. Щоб запобігти одночасному вмиканню контакторів, у схемі застосовано дволанцюгові кнопки керування *SBF* і *SBR*, а також взаємоблокування блок-контактами цих контакторів.

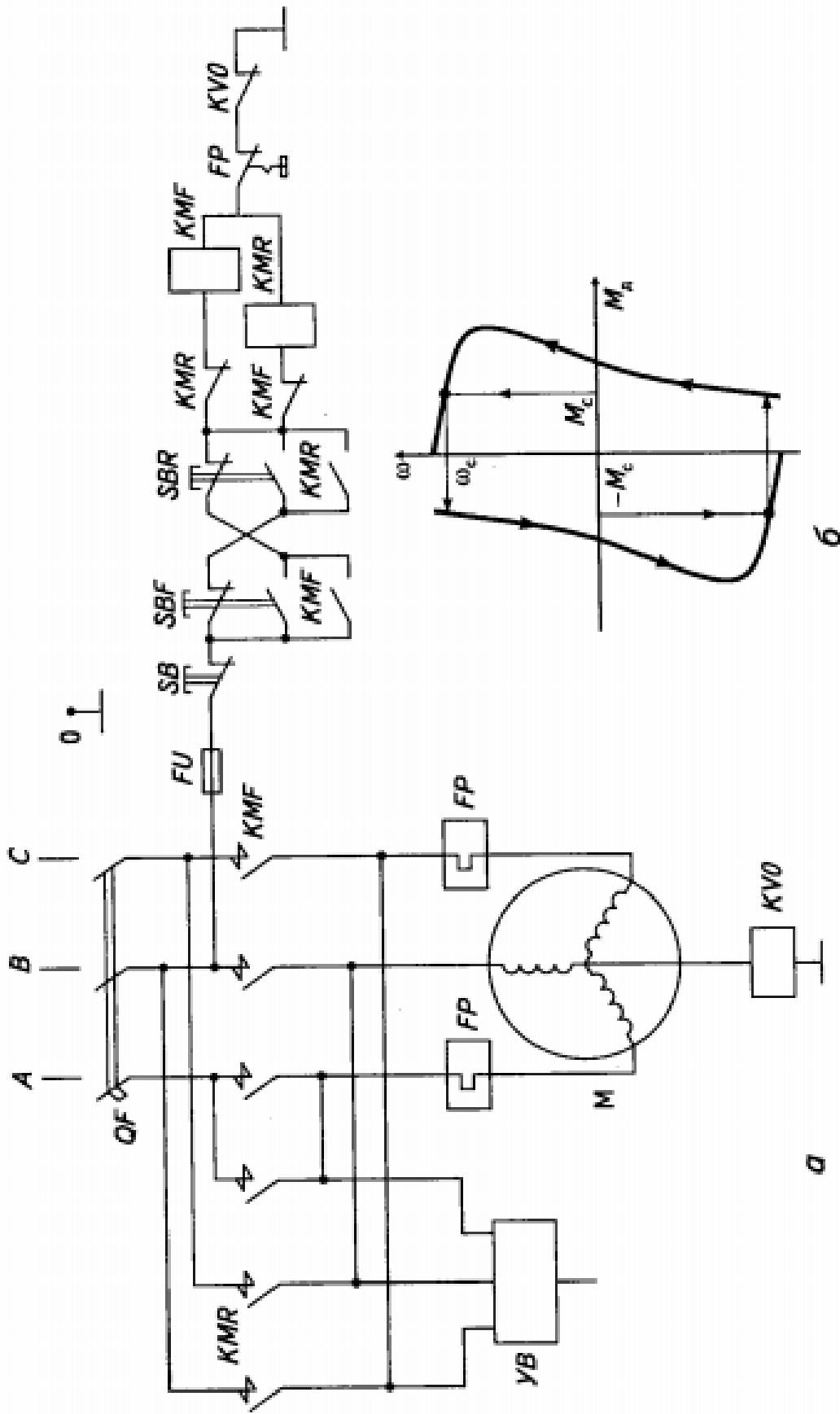


Рис. 5.12

Може також використовуватися механічне блокування контакторів від одночасного вмикання за допомогою важіля.

Пускогальмівні характеристики електропривода в координатах $\omega(M)$ зображені на рис. 5.12, б.

Слід зазначити, що режими пуску й особливо реверсу короткозамкнених двигунів супроводжуються значними електричними, тепловими і механічними перевантаженнями мережі, двигуна і механізму. Для мережі — це істотні осідання напруги, які спричиняються стрибками пускового струму; для двигуна — теплові й механічні перевантаження.

Для зменшення перевантажень режим реверсу доцільно здійснювати у два етапи: спочатку загальмувати двигун, а потім запустити його в іншому напрямі.

Схема керування пуском асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і динамічним гальмуванням у функції часу

Схема електропривода (рис. 5.13) забезпечує режими прямого пуску і динамічного гальмування у функції часу. Вона складається з лінійного контактора *KML* і контактора динамічного гальмування *KMD*. Оскільки оперативне коло живиться змінним струмом, то як джерело постійного струму для живлення статора двигуна в режимі динамічного гальмування і живлення електромагнітного реле часу *KTD* в схемі використовується випрямляч *VD*. Інтенсивність динамічного гальмування регулюється резистором R_{br} , за допомогою якого встановлюється необхідне значення струму в статорі.

Пуск двигуна здійснюється натисканням кнопки *SB2*, після чого одержує живлення лінійний контактор *KML*, який силовими контактами подає напругу на статор двигуна, блок-контактами подає живлення на обмотку реле часу динамічного гальмування і блокує кнопку *SB2*. Контакти реле *KTD* замикаються в колі обмотки контактора *KMD*, але контактор не спрацьовує, оскільки блок-контакти контактора *KML* розмикають коло живлення *KMD*.

Для зупинення двигуна натискається кнопка *SB1*. При цьому контактор *KML* втрачає живлення і вимикає статор від мережі. Одночасно блок-контакти *KML* замикаються в колі обмотки *KMD* і розмикаються в колі реле *KTD*. Контактор *KMD* подає постійний струм

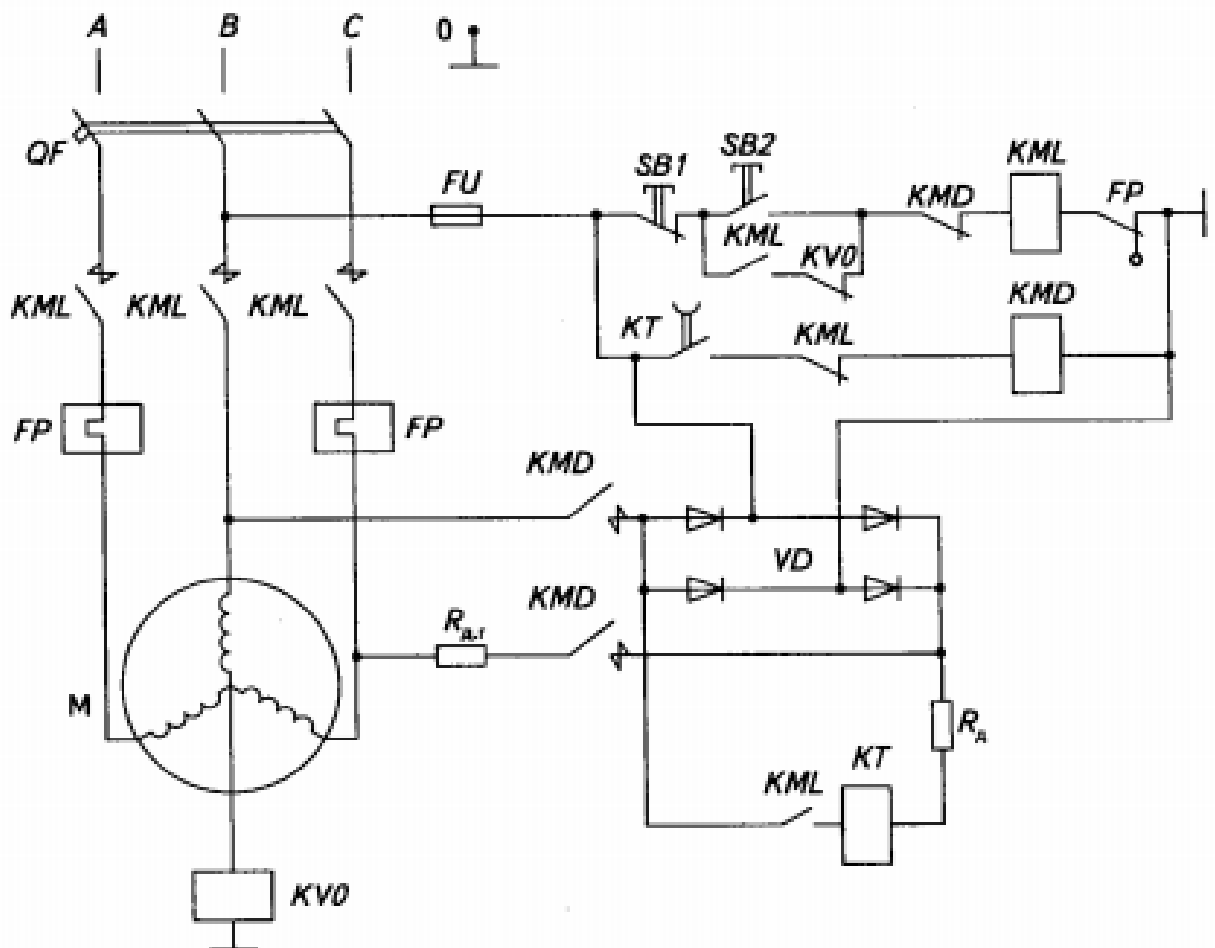


Рис. 5.13

від випрямляча *VD* на дві фази статора двигуна. Двигун переходить у режим динамічного гальмування.

Після закінчення витримки часу реле *KTD* і його контакти розривають коло живлення контактора *KMD*. Схема повертається у вихідне положення.

У схемі керування від коротких замикань двигун захищає автоматичний вимикач *QF*; від перевантажень — теплове реле *FP*; від обриву фази і неповнофазного режиму — реле нульової напруги *KVO*, яке вмикається між нулем обмотки статора і нульовою шиною мережі; оперативне коло і коло динамічного гальмування захищає запобіжник *FU*.

Через неможливість одночасного вмикання статора до джерела змінного і постійного струму в схемі використовується взаємне блокування за допомогою блок-контактів контакторів *KML* і *KMD*.

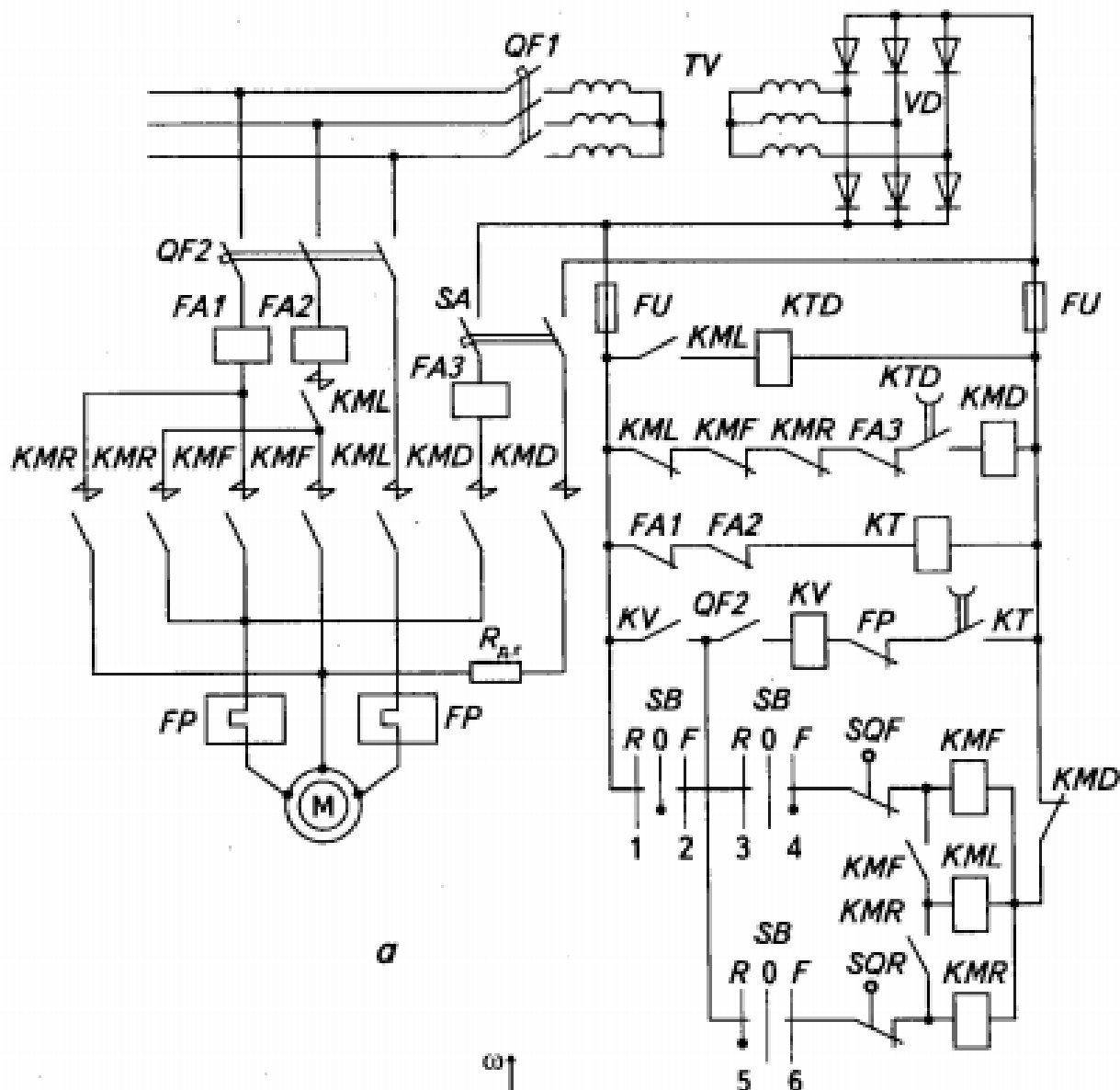
**Схема керування пуском, противмиканням
і динамічним гальмуванням
асинхронного двигуна
з короткозамкненим ротором**

Для двигунів, які працюють у повторно-короткочасних режимах із великою частотою вмикань, використовують пускогальмівну апаратуру на постійному струмі. Це забезпечує надійнішу й довготривалішу роботу приводу порівняно зі схемами з апаратурою на змінному струмі. Варіант схеми з пусковою апаратурою на постійному струмі наведено на рис. 5.14, а.

Джерелом постійного струму в схемі є випрямляч *VD*, який живить оперативне коло і коло динамічного гальмування. Випрямляч *VD* одержує живлення від узгоджувального трансформатора *TV*, вторинна напруга якого визначається напругою апаратури керування. Оскільки контактори постійного струму випускаються з одною парою силових контактів, то для забезпечення пуску, реверсу і гальмування застосовуються лінійний контактор *KML*, контактор для напрямку «вперед» *KMF*, контактор для напрямку «назад» *KMR*. Для вмикання двигуна в мережу обов'язково мають бути ввімкненими дві пари контакторів *KML*, *KMF* або *KML*, *KMR*. Контактор *KMD* подає постійний струм на дві фази обмотки статора в режимі динамічного гальмування. Керування пускогальмівними режимами здійснюється за допомогою універсального перемикача, який має три положення: нульове («0»), вперед («*F*»), назад («*R*») — і три контактні групи.

У вихідному положенні універсальний перемикач *SB* встановлюють у нульове положення. Вмикають автомати *OF1*, *OF2* і рубильник *SA*. Блок-контакти *OF2* підготовляють до вмикання живлення реле *KV*. Одержує живлення реле часу *KT*, яке своїми контактами вмикає реле нульового захисту *KV*. Контакти *KV* шунтують контактну групу *S1* (точки 1 і 2).

Для пуску двигуна для напрямку «вперед» універсальний перемикач ставлять у положення *F*. Замикається контактна група *S2* (точки 3 і 4), спрацьовують *KML* і *KMF*. На статор двигуна подається напруга з чергуванням фаз для напрямку «вперед». Від кидка пускового струму спрацьовує реле максимального струму *FA1*, *FA2*, але реле *KV* перебуватиме в спрацьованому стані на час пуску завдяки утриманню замкненими контактів реле часу *KT*. Одночасно блок-контакти *KML* вмикають реле часу динамічного гальмування *KTD*,



a

б

Рис. 5.14

яке підготовляє коло живлення контактора динамічного гальмування *KMD*.

Схема реалізує режим противмикання після попередньої зупинки двигуна. Це здійснюється завдяки блокуванню кола живлення обмоток пускових контакторів *KML*, *KMF*, *KMR* блок-контактами *KMD*. Коли перемикач *SB* переводять з положення «*F*» у положення «*R*», втрачають живлення контактори *KML*, *KMF*, які силовими контактами вимикають двигун з мережі, а блок-контактами вмикають контактор динамічного гальмування *KMD*. Силові контакти *KMD* подають постійний струм на статор двигуна, а блок-контакти вимикають коло живлення обмоток пускових контакторів до закінчення витримки часу реле *KTD*, живлення якого переривається блок-контактами *KML*. Після завершення динамічного гальмування, коли контактор *KMD* вимикається, створюється коло для живлення обмоток контактора *KML* і *KMR*. Статор двигуна одержує живлення для роботи в напрямі «назад».

Щоб зупинити двигун динамічним гальмуванням, перемикач *SB* переводять у положення «0».

У схемі забезпечено захист від коротких замикань, неповнофазних режимів, самозапущів, пониження напруги нижче допустимого значення. Так, захист від коротких замикань силового та оперативного кіл здійснюють автоматичні вимикачі *QF1*, *QF2* і запобіжники *FU*; захист від тривалих перевантажень забезпечується з витримкою часу і реалізований на струмових реле *FA1*, *FA2* і реле часу *KT*. Струм спрацювання цих реле налагоджується на величину $I_{FA1,FA2} = (1,05 \dots 1,1) I_{c.n.}$.

Витримка часу t_{KT} залежить від часу пуску двигуна. Тепловий захист *FP* певною мірою дублює максимально струмовий захист. Ці два захисти здійснюють контроль за повнофазністю роботи схеми. Нульовий захист забезпечує реле *KV*.

Пускову діаграму наведено на рис. 5.14, б.

Схема керування пуском і динамічним гальмуванням асинхронного двигуна із фазним ротором у функції часу

Електрична схема керування АД (рис. 5.15, а) забезпечує пуск двигуна у дві ступені і динамічне гальмування. Пускогальмівні режими формуються у функції часу. Обмеження струму двигуна в

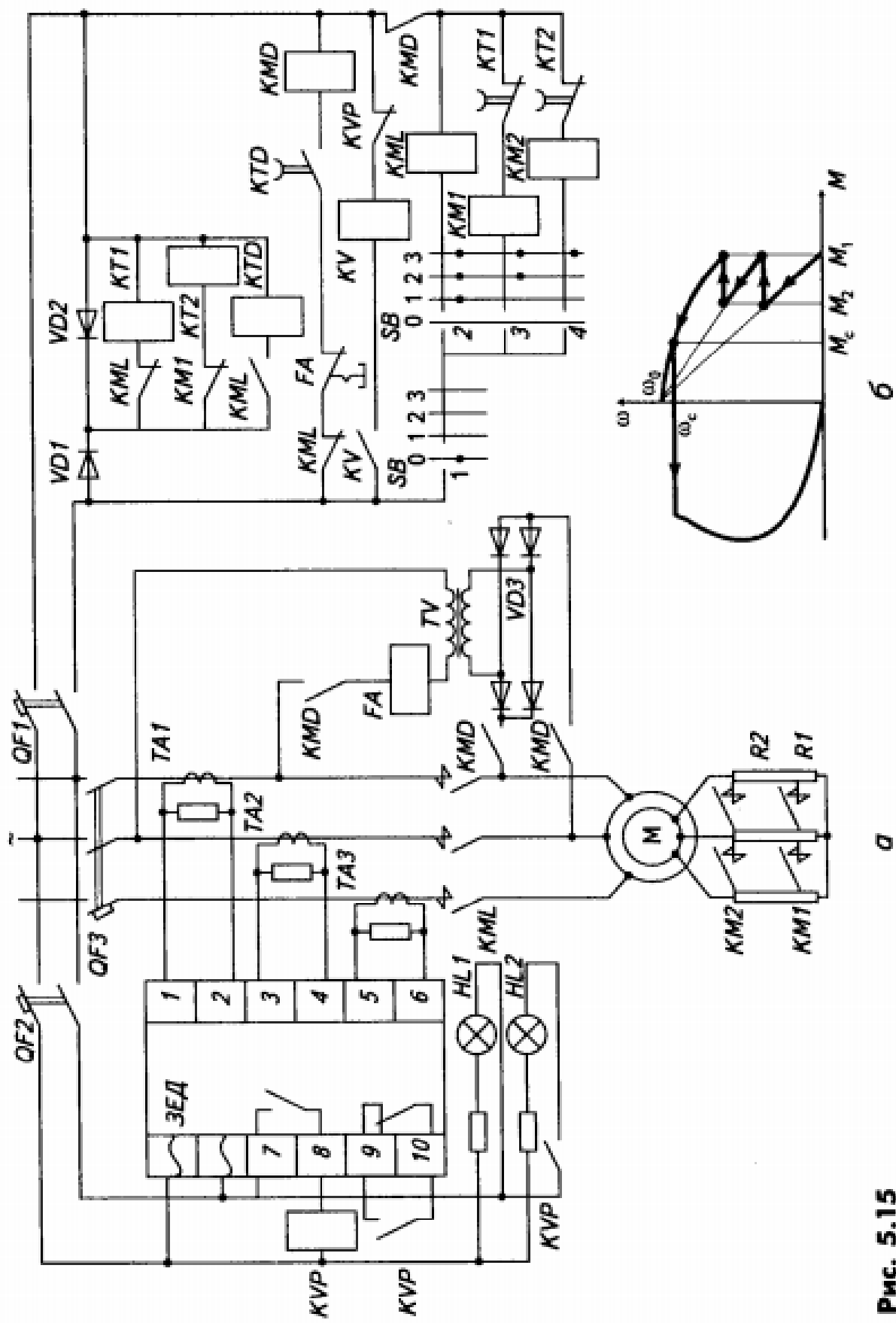


Рис. 5.15

пускових режимах здійснюють резистори $R1$, $R2$, які шунтуються контакторами прискорення $KM1$, $KM2$. Задане значення постійного струму, який подається на дві фази статора в режимі динамічного гальмування, визначається відповідним вибором напруги вторинної обмотки трансформатора TU .

Оскільки оперативне коло живиться змінним струмом, то для живлення реле часу $KT1$, $KT2$ і динамічного гальмування KTD у схемі передбачений випрямляч, реалізований на діодах $VD1$ і $VD2$. Живлення постійним струмом кола динамічного гальмування здійснюється через трансформатор TU і діодний міст $VD3$.

На відміну від попередніх схем у цій схемі використовується електронна система захисту ЗЕД (захист електричного двигуна). Ця система, залежно від вимог, може виконувати різноманітні захисні функції (наприклад, захист від перевантажень, коротких замикань, обриву фази і неповнофазного режиму), визначати стан ізоляції системи живлення безпосередньо двигуна тощо. Блок захисту одержує живлення від загальної мережі, а контроль за станом системи здійснює за допомогою трансформаторів струму $TA1$, $TA2$, $TA3$, які вимірюють струм статора. Захист діє на систему керування за допомогою реле KVP , контакти якого перебувають у колі живлення реле нульового захисту KV . Візуальний контроль за станом здійснюється за допомогою сигнальних ламп $HL1$, $HL2$.

Керування пускогальмівними режимами і роботою двигуна на штучних характеристиках здійснюється за допомогою універсального перемикача SB , який має чотири положення: нульове «0» і три пускові. У вихідному положенні перемикач SB встановлюють у положення «0», вмикають вимикачі $QF1$, $QF2$, $QF3$. При цьому спрацьовують реле нульового захисту KV і реле прискорення $KT1$, $KT2$. Контакти KV шунтують контактну групу $K1$, а контакти $KT1$ і $KT2$ розмикаються в колі обмоток контакторів $KM1$ і $KM2$.

Для пуску двигуна з виходом на природну характеристику потрібно перевести перемикач SB у положення «3». В результаті через контактну групу $K2$ одержує живлення лінійний контактор KML , який силовими контактами вмикає статор двигуна в мережу. Блок-контакти KML замикаються в колі котушки реле часу динамічного гальмування KTD . Реле KTD замикає контакти в колі котушки контактора KMD , а реле прискорення $KT1$ починає відлік часу. Двигун розганяється на штучній характеристиці з резисторами $R1$, $R2$ в колі ротора. По закінченні витримки часу реле $KT1$ своїми контактами

вмикає контактор $KM1$, який силовими контактами шунтує силовий резистор $R1$, а блок-контактами розриває коло живлення котушки реле прискорення $KT2$. Двигун розганяється на штучній характеристиці з резистором $R2$ в колі ротора. По закінченні витримки часу реле $KT2$ своїми контактами вмикає контактор $KM2$, який силовими контактами шунтує пусковий резистор $R2$. Двигун виходить на природну характеристику. Пускову діаграму наведено на рис. 5.15, б.

Для зупинення двигуна динамічним гальмуванням слід перевести перемикач SB у положення «0». При цьому розмикаються контакти $K1, K2, K3$ перемикача SB ; втрачають живлення пускові контактори $KML, KM1, KM2$. Двигун вимикається з мережі. Блок-контакти KML вмикають контактор KMD на час витримки часу KTD . Силкові контакти подають постійний струм на статор двигуна, а блок-контакти KMD блокують пускові контактори на час гальмування двигуна.

У схемі передбачено також захист кола динамічного гальмування від перевантажень і коротких замикань, що здійснює реле максимального струму FA .

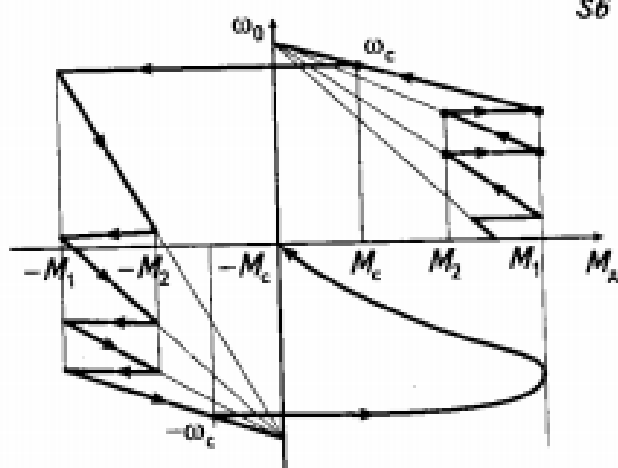
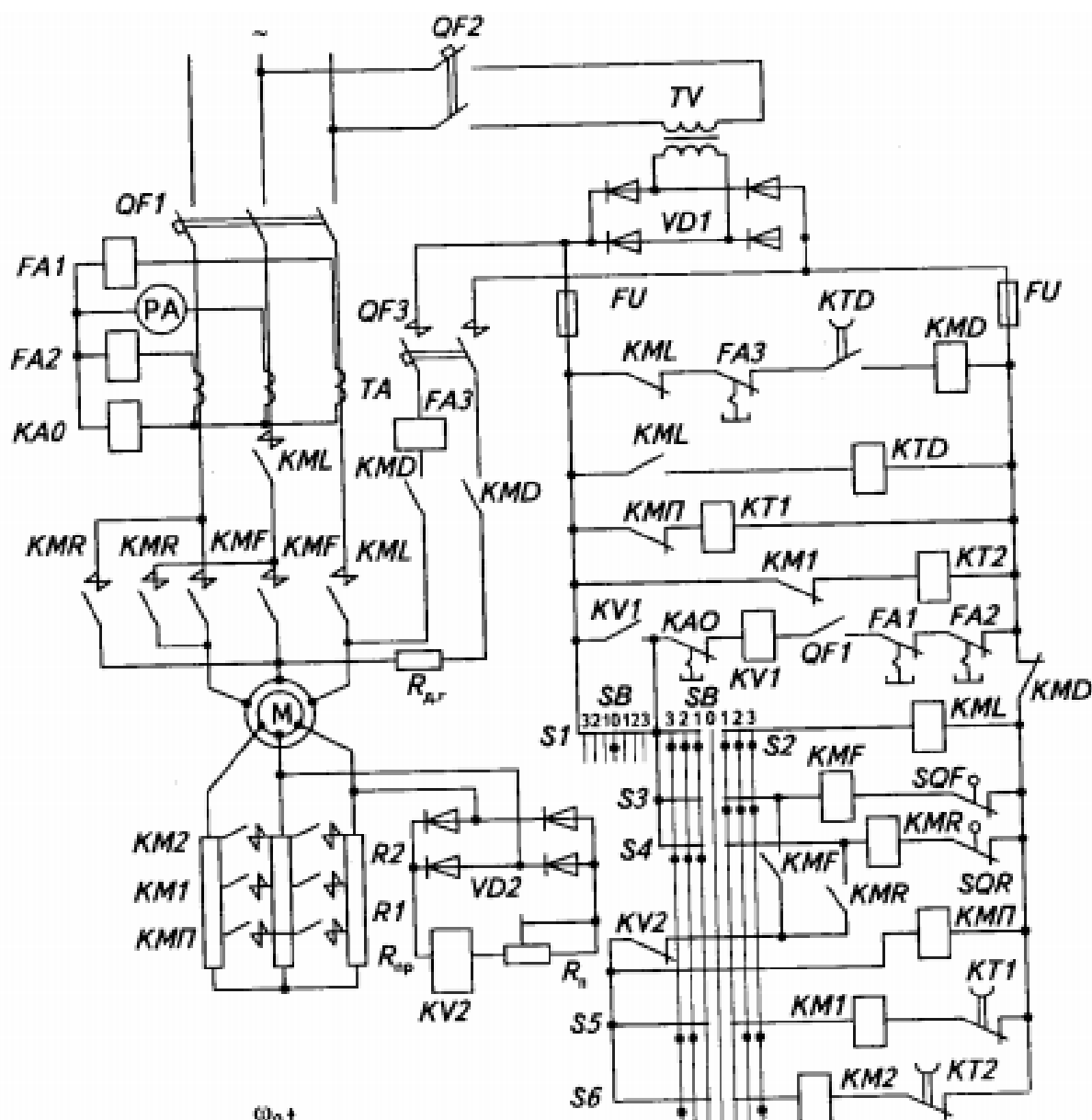
Схема керування пуском, противмиканням і динамічним гальмуванням асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу

Електрична схема керування АД з фазним ротором (рис. 5.16, а) забезпечує:

- пуск у дві ступені у функції часу;
- противмикання у функції ЕРС ротора;
- динамічне гальмування у функції часу;
- роботу на штучних характеристиках.

Обмеження струму в пускових режимах здійснюється резисторами $R1, R2$; у режимах противмикання — резистором R_{op} ; у режимах динамічного гальмування — резистором $R_{д.г}$.

Живлення оперативного кола і кола динамічного гальмування постійним струмом здійснюється від випрямляча $VD1$ через узгоджувальний трансформатор TV . Живлення реле противмикання $KV2$, яке контролює ЕРС ротора, постійним струмом забезпечує випрямляч $VD2$, підімкнений до двох фаз ротора двигуна.



6

Рис. 5.16

Керування роботою двигуна здійснюється за допомогою універсального перемикача *SB*, який має сім положень: одне нульове «0», три «вперед» («*F*»), три «назад» («*R*»).

Схема працює так. Підготовка до роботи здійснюється вмиканням автоматичних вимикачів *QF1*, *QF2* і рубильника *SA*; перемикач встановлюється в нульове положення. При цьому одержує живлення реле нульового захисту *KV1*, яке своїми контактами шунтує першу контактну групу *S1* перемикача *SB*. Спрацьовують реле часу (прискорення) *KT1*, *KT2*, розмикаючи свої контакти в колі живлення контакторів прискорення *KM1*, *KM2*.

Для пуску двигуна в напрямі «вперед» з виходом на природну характеристику перемикач *SB* переводять у третє положення («*F*»). Замикаються контактні групи *S2*, *S3*, *S5*, *S6*; розмикається контактна група *S1*. Спрацьовують контактори *KML*, *KMF*, і двигун запускається в напрямі «вперед». Блок-контакти контактора *KML* розмикаються в колі обмотки контактора динамічного гальмування *KMD*. Спрацьовує реле часу динамічного гальмування *KTD*, через блок-контакти контактора противмикання *KMP* і контактора прискорення *KM1* одержують живлення реле *KT1*, *KT2*. По закінченні витримки часу контакти *KT1* замикаються в колі котушки контактора *KM1*, який силовими контактами шунтує пусковий резистор *R1*, а блок-контактами розмикає коло живлення реле *KT2*. По закінченні витримки часу реле *KT2* замикає свої контакти в колі контактора *KM2*, який шунтує пусковий резистор *R2*. Двигун виходить на природну характеристику.

Для реверсування двигуна перемикач *SB* переводять у третє положення («*R*»). В результаті замикається контактна група *S4* і розмикається група *S3* універсального перемикача *SB*. Чергування фаз обмотки статора змінюється для напрямку обертання «назад». Втрачають живлення контактори *KMP*, *KM1*, *KM2*. Оскільки ЕРС ротора в режимі противмикання збільшує своє значення порівняно з номінальним ($E_{p,n} > E_{p,n}$), то реле *KV2* спрацьовує і розмикає свої контакти в колі обмотки контактора *KMP*. Реверс двигуна відбувається за наявності резисторів *R1*, *R2* і R_{np} у колі ротора двигуна, які обмежують струм допустимими значеннями. Спрацьовують реле часу *KT1*, *KT2*, розмикаючи свої контакти в колі обмоток контактора *KM1*, *KM2*. Двигун гальмується, зменшується його ЕРС. Коли ЕРС ротора зменшиться до значення $(1,1...1,15)E_{p,n}$, контакти реле *KV2* замкнуться

в колі обмотки контактора *KMP*. Силкові контакти *KMP* шунтують резистор R_{rp} . Далі процес відбувається аналогічно пуску.

Режим динамічного гальмування здійснюється перемиканням *SB* у нульове положення. При цьому втрачають живлення контактори *KML*, *KMR*, *KMP*, *KM1*, *KM2*. Статор двигуна вимикається з мережі, а в ротор вмикаються пускові резистори $R1$, $R2$, R_{rp} . Блок-контакти *KML* вмикаються в колі живлення котушки контактора *KMD*, а інші блок-контакти розмикаються в колі реле часу *KTD*. На період витримки часу реле *KTD* контактор *KMD* вмикається і подає постійний струм на дві фази статора. Двигун переходить у режим динамічного гальмування. Після закінчення витримки реле часу *KTD* розмикає коло живлення контактора *KMD*. Схема повертається у вихідне положення.

Схемою передбачена робота двигуна на проміжних штучних характеристиках. Для цього універсальний перемикач *SB* переводять у перше, друге або третє положення для режиму «вперед» («*F*») або «назад» («*R*»).

Схема забезпечує максимальний струмовий захист миттєвої дії за допомогою струмових реле *FA1*, *FA2*, які вимірюють струм статора трансформаторів струму *TA*; захист від неповнофазного режиму і обриву фази — реле нульової послідовності струму *КАО*; захист від самозапуску і недопустимого зниження напруги живлення — реле нульового захисту *KV1*; захист від перевантажень і коротких замикань оперативного кола — запобіжників *FU*. Автоматичні вимикачі *QF1*, *QF2* забезпечують захист від коротких замикань. Пускову діаграму наведено на рис. 5.16, б.

Схема керування багатоступінчастим пуском асинхронного двигуна з фазним ротором

Електрична схема (рис. 5.17) призначена для керування багатоступінчастим пуском АД і забезпечує плавний пуск у функції часу. Тривалість пуску залежить від кількості пускових ступенів. Схема має чотири пускові ступені і може забезпечити довготривалість пуску — $t_{пуск} = (15...30)$ с. Її особливістю є те, що після закінчення пуску всі реле часу і контактори прискорення, крім контактора останньої ступені, вимикаються. Це забезпечує значну економію електроенергії і збільшує тривалість служби електричних апаратів.

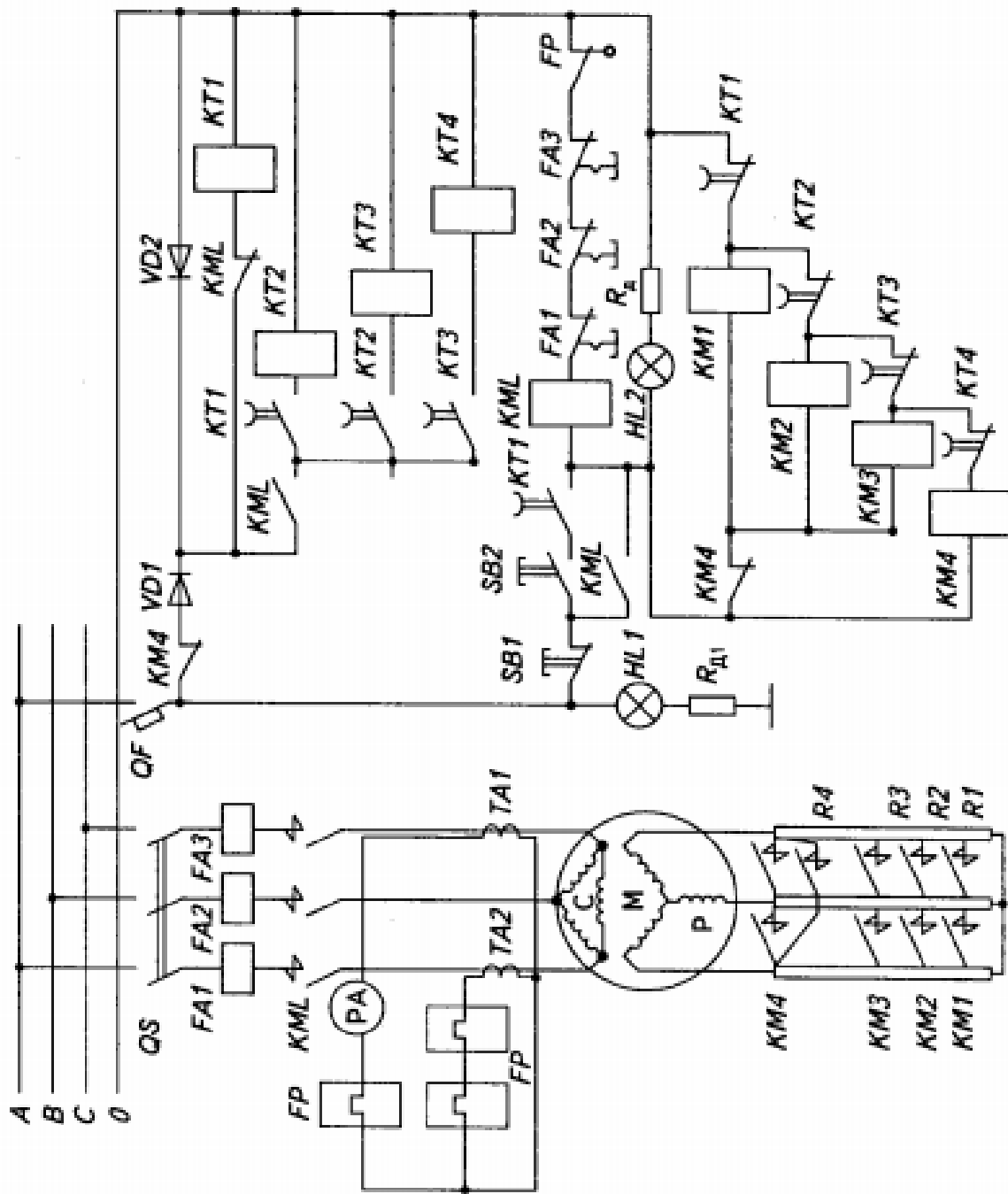


Рис. 5.17

У вихідному положенні після вмикання автоматичного вимикача *OF* і рубильника *OS* спрацьовує реле часу *KT1* і першою парою контактів готує живлення лінійного контактора *KML*, другою — коло живлення реле часу *KT2*. Третя пара контактів розмикається в колі живлення котушок контакторів прискорення *KM1...KM4*.

За натискання пускової кнопки *SB2* спрацьовує контактор *KML*, який силовими контактами подає живлення на статор двигуна, блок-контактами шунтує кнопку *SB2*, а також подає живлення на котушки реле часу *KT2*, *KT3*, *KT4* і розмикає у колі котушок реле *KT1*. Двигун розганяється при ввімкнених у коло ротора резисторах *R1*, *R2*, *R3*, *R4*. Після закінчення витримки часу реле *KT1* відпускає свої контакти, перша пара з яких замикається в колі котушки контактора *KM1*, а друга — розмикається в колі котушки реле *KT2*. Контакт *KM2* вмикається і шунтує пусковий резистор *R2*. Двигун переходить на другу пускову характеристику. Далі процес повторюється.

Контактор останньої пускової ступені *KM4* силовими контактами шунтує пусковий резистор *R4*, а блок-контактами розриває коло живлення котушок контакторів *KM1*, *KM2*, *KM3* і коло живлення обмоток усіх реле часу. Двигун виходить на природну характеристику, а працювати залишається лише лінійний контактор *KML* і контактор прискорення *KM4*.

У схемі передбачено захист від коротких замикань, який здійснюється реле максимально струмового захисту *KA1*, *KA2*, *KA3*, і захист від перевантажень двигуна, реалізованого на теплових елементах *FP1*, *FP2*, *FP3*. Для узгодження параметрів теплових реле і струму статора в схемі застосовані трансформатори струму *TA1*, *TA2*. Захист оперативного кола здійснює автоматичний вимикач *OF*. Світлова індикація забезпечується сигнальними лампами *HL1*, *HL2*. Лампа *HL1* фіксує наявність напруги в оперативних колах, лампа *HL2* сигналізує про ввімкнення двигуна.

З'єднання силових контактів контактора *KM4* в трикутник дає змогу зменшити струм через контакти в $\sqrt{3}$ разів, що, своєю чергою, дає можливість зменшити габарити контактора.

ТИПОВІ СХЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

Загальні характеристики

Синхронні двигуни (СД) широко застосовуються в електроприводах механізмів із довготривалим режимом роботи. Це визначається високими механіко-економічними показниками СД, основними з яких є:

- високий ККД ($\eta = 0,94 \dots 0,98$);
- високий коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, який можна регулювати в широких межах;
- можливості віддавати реактивну потужність, підтримувати $\cos \varphi$ і напругу у вузлі підмикання СД, а також здійснення регулювання у функції внутрішнього кута θ , у функції активної складової струму статора тощо;
- можливість регулювати коефіцієнт перевантаження двигуна за моментом $\lambda_n = M_{max} / M_n$, діючи на струм збудження СД, що зменшує залежність від коливань напруги живлення U_n двигуна;
- перевантажувальна здатність СД при дії стрибкоподібного навантаження $M_c \cdot 1(t)$ вища, ніж при дії повільно зростаючого навантаження, що визначається взаємодією магніторушійної сили обмоток статора і збудження ротора на час перехідного процесу;
- момент двигуна пропорційний напрузі статора ($M_d = U_c$);
- двигун забезпечує абсолютно жорстку (астатичну) механічну характеристику в робочому режимі;
- значний повітряний проміжок між статором і ротором, унаслідок чого характеристики і властивості СД неістотно залежать від спрацювання підшипників і неточності монтажу.

Разом із тим СД мають і недоліки, що визначається більшим, ніж у асинхронного двигуна, повітряним зазором і відповідно значним розсіянням в асинхронному режимі при пуску:

- великі пускові струми $I_{пуск} = (3 \dots 8) I_{c.n.}$. Прямий пуск двигунів великої потужності, як правило, супроводжується значним осіданням напруги мережі;

- складна технологія пуску і експлуатації СД. Обмежений час пуску і кількість повторних пусків також обмежена певним часом;
- відносна складність експлуатації СД, що потребує високої кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- відносно малі пускові моменти $M_n = (0,4...1,5)M_n$, що істотно ускладнює процес пуску;
- менша, порівняно з АД, експлуатаційна надійність (це стосується СД з контактними кільцями);
- значні масогабаритні показники.

Пуск синхронних двигунів

Більшість негативних показників синхронних двигунів пов'язані з їхнім пуском. Тому СД переважно запускаються як асинхронні двигуни. Для цього в ротор двигуна закладається пускова короткозамкнена обмотка типу «біляча клітка». Це, звичайно, ускладнює як конструкцію двигуна, так і формування режимів пуску.

Асинхронний пуск СД з розімкненою обмоткою збудження (ОЗ) здійснювати не можна. Пояснюється це тим, що під час розгону обертове магнітне поле індукує в ОЗ ЕРС $E_{z6} = 4,44f_2w_{z6}\Phi_m$. Тут $f_2 = f_1s$ — частота зміни струму в ОЗ, де f_1 — частота живлення статора; s — ковзання; w_{z6} — кількість витків ОЗ; Φ_m — амплітуда магнітного потоку обертового поля. Завдяки великій кількості витків ОЗ E_{z6} досягає значної величини, що може викликати пробій ізоляції обмотки, якщо не підімкнути її на час пуску до розрядного резистора R_p . Значення опору R_p має бути таким, щоб мінімізувати перенапругу на ОЗ та зменшити дію одноосьового моменту в діапазоні зміни швидкостей $0,6\omega_0 \leq \omega \leq 0,8\omega_0$. Залежно від типу двигуна і виду навантаження опір R_p перебуває в межах $R_p = (6...10)R_{z6}$, де R_{z6} — активний опір обмотки збудження.

Резистор R_p має бути підімкнений до ОЗ лише до моменту подання постійного струму в ОЗ, коли двигун втягується в синхронізм ($\omega \approx 0,95\omega_0$). Невідмикання R_p призводить до додаткових втрат потужності в розрядному резисторі R_p і негативно впливає на стійкість роботи СД.

Отже, процес прямого пуску з виходом двигуна в синхронний режим містить три етапи:

- режим асинхронного пуску з підмиканням R_p до ОЗ;

- режим втягування в синхронізм, що здійснюється при кутовій швидкості $\omega \approx 0,95\omega_0$ з одночасним відмиканням R_p і поданням струму збудження;
- вихід двигуна на синхронну швидкість.

Характеристики прямого пуску СД в координатах $\omega(M)$, $\omega(I_c)$ і $\omega(I_p)$ зображені на рис. 5.18. Тут $I_{c.n}$ — пусковий струм статора; $I_{p.n}$ — струм в обмотці збудження під час пуску.

Струм I_p у діапазоні зміни ковзання $s \approx 1 \dots 0,2$ підтримується майже на одному рівні. Це пояснюється тим, що індуктивний опір ОЗ значно більший за активний опір $X_{\Sigma} \gg (R_{\Sigma} + R_p)$, а струм наближено можна визначити так:

$$I(s) = \frac{E_{\Sigma,0} s}{\sqrt{(X_{\Sigma,0} s)^2 + (R_{\Sigma} + R_p)^2}} \cong \frac{E_{\Sigma,0}}{X_{\Sigma,0}}$$

Тут $E_{\Sigma,0}$ — ЕРС, яка індукується в ОЗ при ковзанні $s = 1$; $X_{\Sigma,0} = 2\pi f_1 L_{\Sigma}$ — індуктивний опір ОЗ при ковзанні $s = 1$, де L_{Σ} — індуктивність ОЗ.

Застосування прямого пуску обмежено потужністю мережі живлення, допустимими межами осідання напруги, міцністю лобових частин обмотки статора. Якщо конструкція двигуна не допускає прямого пуску або пускові струми викликають значні коливання напруги мережі, то застосовують пуск СД або зі зниженою напругою, або з напругою, сформованою за певним законом.

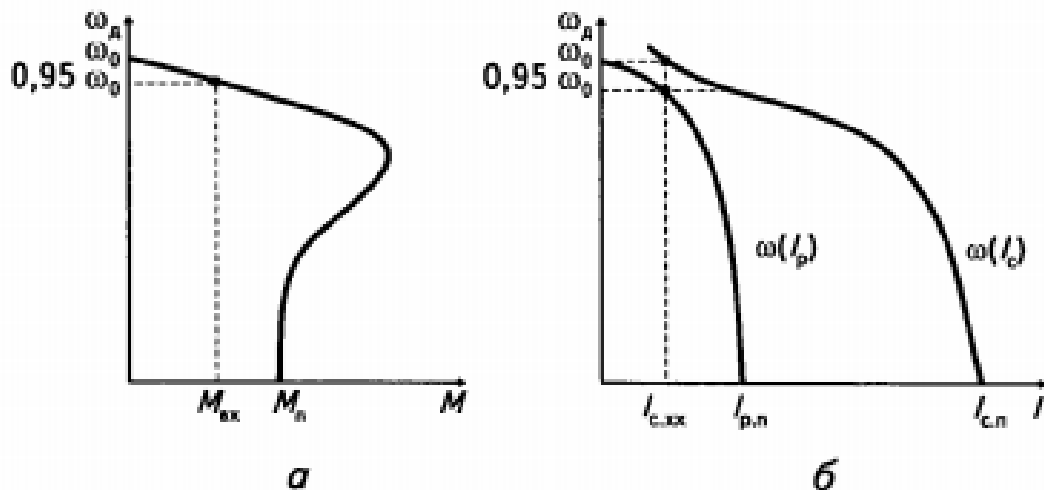


Рис. 5.18

У першому випадку застосовують реакторний пуск. При цьому напруга на статор СД надходить через реактор з індуктивним опором X_p , а коли пусковий струм зменшується до допустимого значення, реактор шунтується і на статор подається номінальне значення напруги.

Однолінійну схему реакторного пуску і пускові характеристики в координатах $\omega(M)$ і $\omega(t_c)$ відповідно зображені на рис. 5.19, а—в. Тут П — природні характеристики; Ш — штучні характеристики, коли в коло статора введений реактор. Як правило, реакторний пуск двигунів здійснюється у функції часу. Вибір реакторів здійснюється за допустимим зниженням напруги на шинах і за умови забезпечення мінімальної напруги, необхідної для руху двигуна і розгону його до швидкості, коли пусковий струм не перевищує допустимих значень. Слід врахувати, що для успішного пуску момент $M_{дв}$ має перевищувати момент опору M_c на 10 % ($M_{дв} \cong 1,1M_c$).

Недоліки реакторного пуску полягають у тому, що пускові характеристики можна змінювати лише дискретно, а пусковий струм і момент двигуна при переході зі штучної характеристики на природну залежать від зміни навантаження і моменту інерції.

У другому випадку застосовують системи м'якого пуску, у яких використовують тиристорні регулятори напруги (ТРН) або статичні перетворювачі частоти (ПЧ). Якщо передбачається робота СД тільки на номінальних обертах і не передбачається регулювання швидкості, то використання ПЧ для пуску недоцільно.

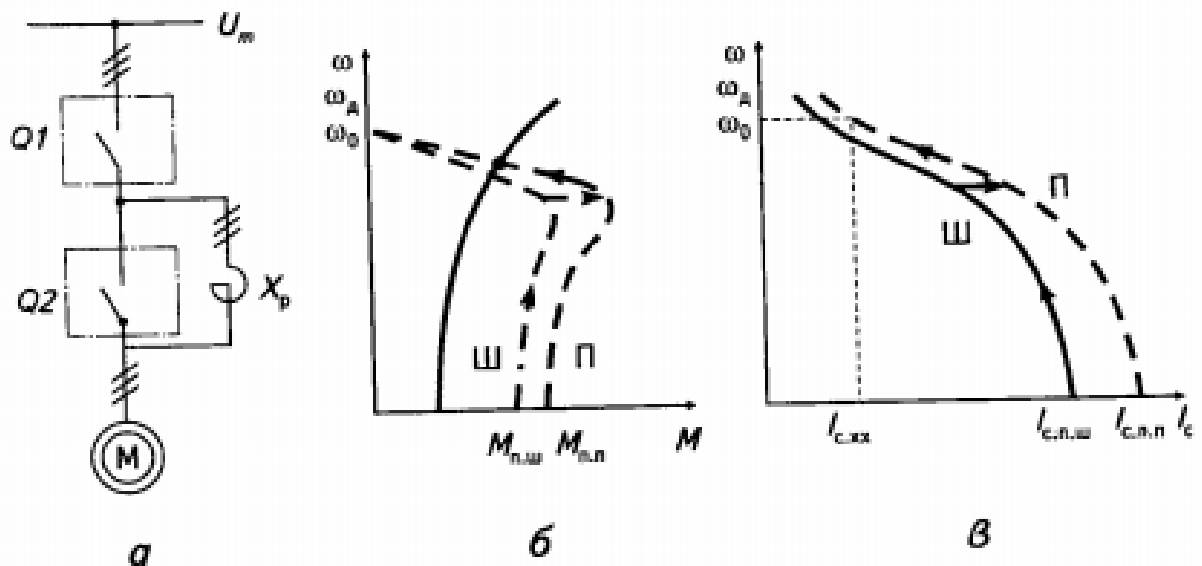


Рис. 5.19

Процес м'якого пуску в електроприводі з ТРН може формуватися як розімкнутою, так і замкнутою системами.

У разі застосування розімкнутої системи формування пускових характеристик здійснюється за допомогою задавача інтенсивності

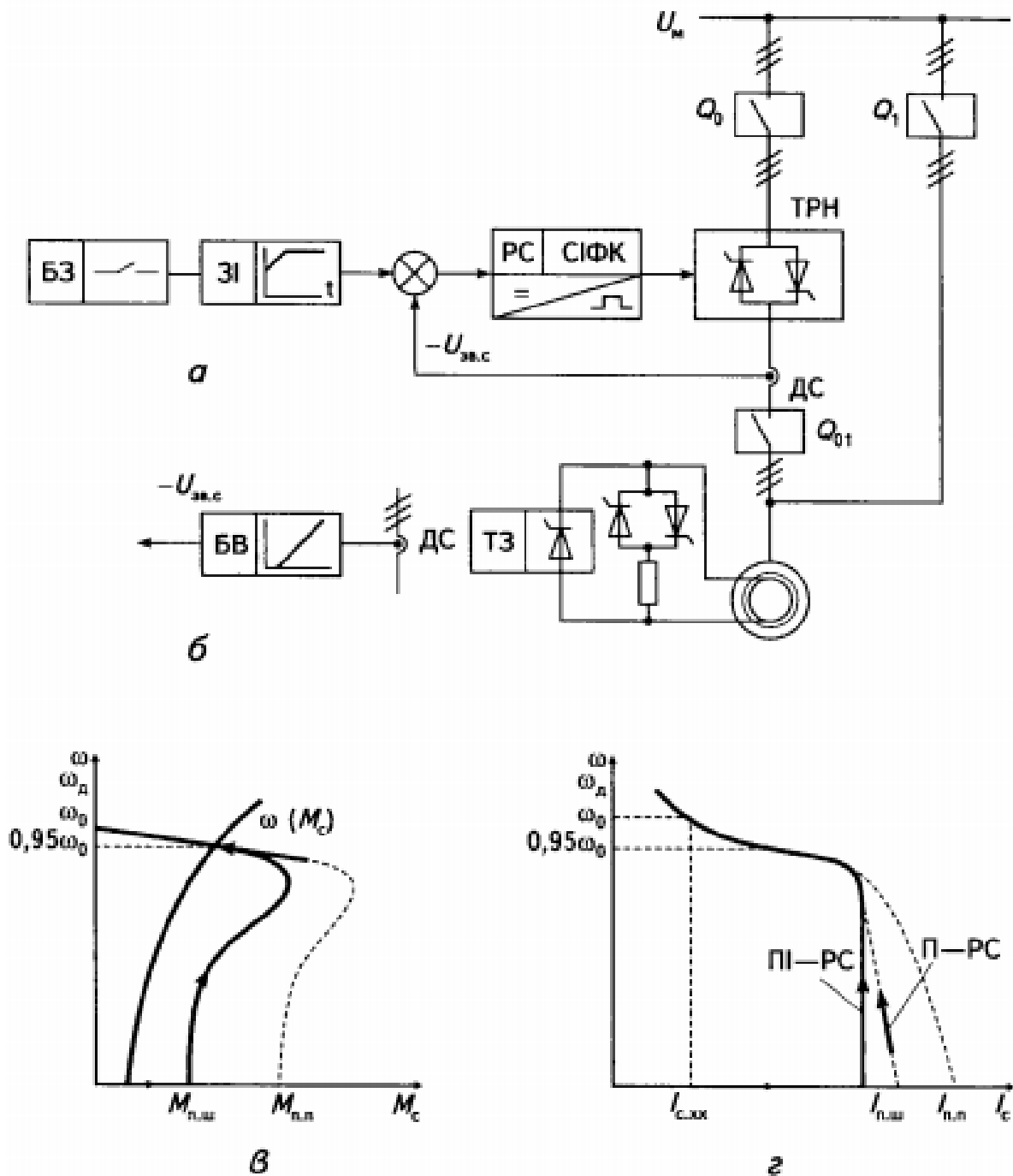


Рис. 5.20

(ЗІ) (рис. 5.20, *а*). Задавач має пропорційно-інтегральну (ПІ) характеристику і підмикається до блока задання БЗ. Пропорційна складова ЗІ визначає початковий пусковий момент, а темп зростання інтегральної складової сигналу ЗІ визначається заданим часом розгону двигуна до підсинхронної швидкості. Оскільки під час пуску струм досягає значення, яке перевищує номінальне, то для обмеження пускового струму допустимими значеннями в схемах передбачається затриманий від'ємний зворотний зв'язок за струмом статора, сигнал якого надходить на вхід регулятора струму РС через блок відсічки БВ з виходу датчика струму статора ДС (рис. 5.20, *б*). Якщо навантаженням Д є вентилятор (рис. 5.20, *в*), то схема пуску буде простішою, а на статор подаватиметься знижена напруга.

Для здійснення м'якого пуску широко застосовуються замкнені системи ТРН—СД з постійнодіючим від'ємним зворотним зв'язком за струмом статора. Варіант схеми такої системи зображений на рис. 5.20, *а*. Система забезпечує формування режиму пуску із заданим значенням пускового струму (рис. 5.20, *з*). У схемі можуть бути використані пропорційно-інтегральні регулятори струму.

Як правило, ТРН застосовують лише для реалізації пуску двигунів. Після закінчення пуску СД підмикається безпосередньо до мережі, а пусковий пристрій ТРН вимикається. Відповідно до однолінійної схеми рис. 5.20, *а* комутація силового кола СД здійснюється в такій послідовності: вмикаються ключі Q_0 , Q_{01} , двигун розганяється до підсинхронної швидкості, подається збудження і двигун втягується в синхронізм, вмикається ключ Q_1 і вимикаються Q_0 , Q_{01} .

За наявності кількох СД використовують лише один пусковий пристрій ТРН, що по чергово здійснює пуск цих двигунів. Однолінійну схему пуску трьох СД за допомогою одного пускового пристрою ТРН наведено на рис. 5.21.

Системи м'якого пуску дають змогу:

- обмежувати пускові струми;
- підвищувати довготривалість роботи двигуна завдяки суттєвому зменшенню електродинамічних зусиль в обмотках двигуна;
- підвищувати довготривалість роботи комутаційної апаратури;
- знімати обмеження на кількість пусків СД.

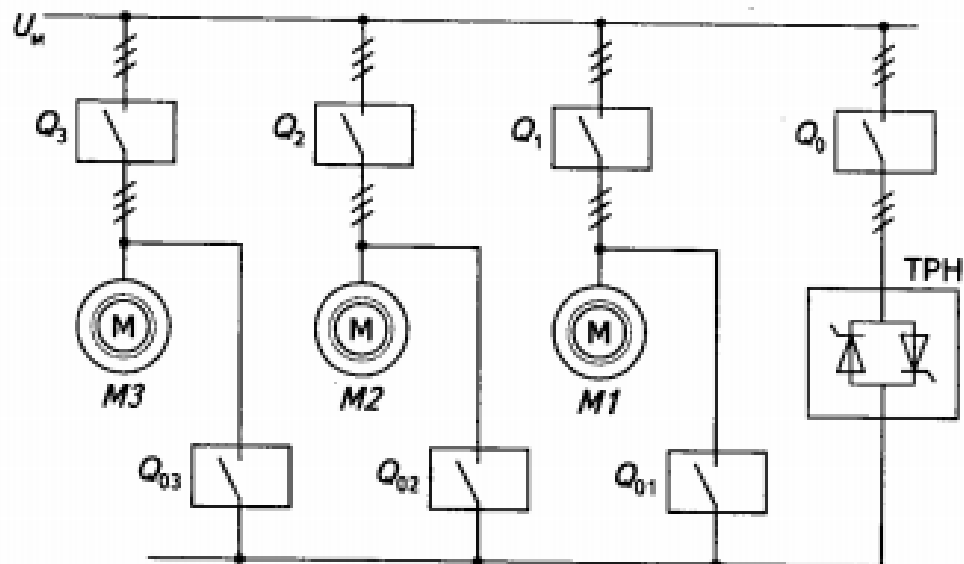


Рис. 5.21

Робота синхронних двигунів в синхронному режимі

Обертальний момент СД є результатом взаємодії обертового магнітного поля статора і магнітного поля обмотки збудження. Взаємодія цих полів створить обертальний момент СД тільки тоді, коли ротор обертається зі швидкістю магнітного поля $\omega_0 = 2\pi f_c / p_p$, тобто синхронно з обертовим полем. Отже, механічна характеристика СД $\omega(M)$ являє собою горизонтальну пряму з ординатою ω_0 . Якщо момент навантаження буде більшим за максимальний $M_{\max}(M_c > M_{\max})$, це призведе до випадання СД із синхронізму. Максимальний момент M_{\max} , до значення якого зберігається синхронна робота СД з мережею, визначається з кутової характеристики $M(\theta)$, яка являє собою залежність моменту двигуна M від кута θ між векторами ЕРС статора E і фазною напругою мережі U_ϕ :

$$M = \frac{3}{\omega_0} \left[\frac{U_\phi E}{X_q} \sin \theta + \frac{U_\phi^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right],$$

де X_q, X_d — реактивні опори відповідно по поздовжній та поперечній осях.

Цей вираз виражає момент явнополюсних машин, а його друга складова визначає реактивний момент СД явнополюсної машини, який показує, що явнополюсний СД може створювати деякий

момент без збудження. Вираз $M(\theta)$ неявнополюсної машини відрізняється від наведеного вище відсутністю другої складової.

Залежності $M(\theta)$ для неявнополюсного (пряма 1) і явнополюсного (пряма 2) СД зображені на рис. 5.22. Тут крива 3 — реактивна складова моменту явнополюсної машини.

Кутові характеристики $M(\theta)$ показують, що максимальні значення моментів M_{\max} СД досягають явнополюсної машини при $\theta_2 = 75\dots 80^\circ$, неявнополюсної — при $\theta_1 = 90^\circ$. Значення M_{\max} характеризує навантажувальну здатність СД. Кратність максимального моменту для більшості СД становить

$$\lambda_n = M_{\max} / M_n = 2\dots 3.$$

Збільшення кута θ за максимальне значення призведе до нестійкої роботи двигуна і випаданню його із синхронізму.

Важливою величиною є номінальний кут θ_n , що характеризує можливий довготривалий режим роботи за умови нагріву з номінальним моментом M_n . Номінальний кут для неявнополюсних двигунів становить $\theta_{n1} = 30\dots 35^\circ$, для явнополюсних — $\theta_{n2} = 25\dots 30^\circ$.

Якщо не передбачається регулювання швидкості СД, то єдиним параметром, за допомогою якого можна регулювати вихідні координати двигуна і змінювати перевантажувальну здатність за моментом λ_n , є ЕРС двигуна E . Регулювання ЕРС, своєю чергою, здійснюється зміною струму збудження $E(I_{\phi})$.

СД відрізняється від інших машин такою властивістю, як можливість регулювати споживання реактивної потужності від мережі, змінюючи струм збудження I_{ϕ} . Якщо СД незбуджений, він споживає реактивну енергію і працює з відстаючим $\cos \varphi$. Для роботи

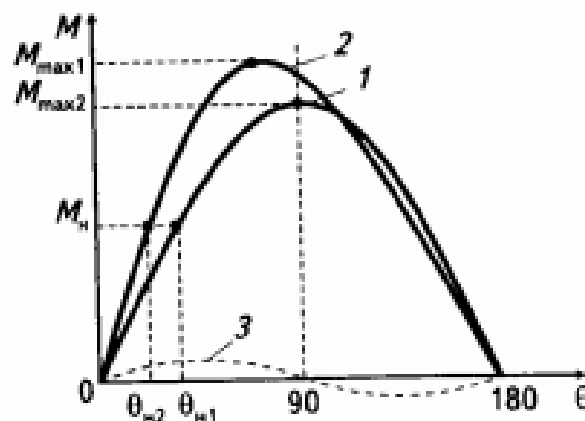


Рис. 5.22

з випереджувальним $\cos \varphi$, коли реактивна потужність віддається в мережу, потрібно перезбудити двигун. При $\cos \varphi = 1$ реактивна потужність не віддається і не споживається.

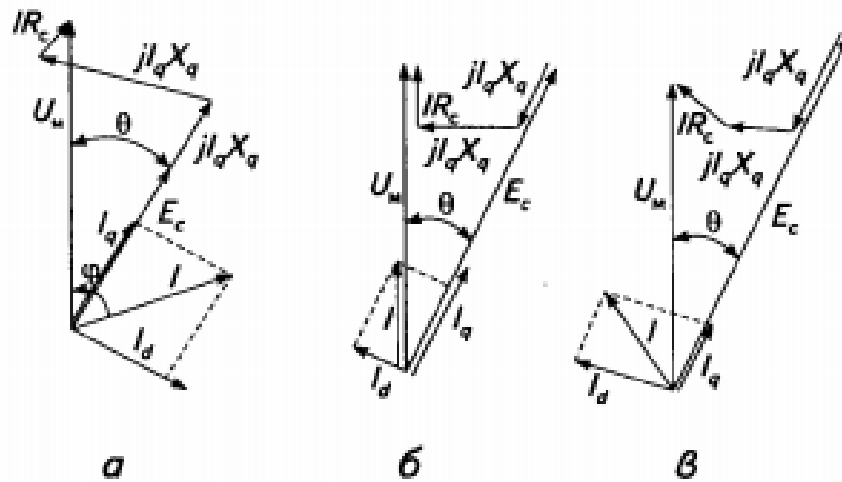


Рис. 5.23

Векторні діаграми СД при постійному навантаженні на його валі, незмінній напрузі мережі та різних значеннях струму збудження зображені на рис. 5.23. Тут I_d і I_q — складові струму статора по поздовжній і поперечній вісях. На рис. 5.23, а наведено векторну діаграму для недозбудженого двигуна, коли частину реактивної потужності, яка йде на струм намагнічення, покриває мережа. У цьому випадку двигун працює з відстаючим $\cos \varphi$. На рис. 5.23, б наведено векторну діаграму для випадку, коли двигун споживає тільки активний струм і $\cos \varphi = 1$. На рис. 5.23, в наведено векторну діаграму, яка відповідає перезбудженому двигунові, коли надлишок реактивної потужності віддається в мережу, а коефіцієнт потужності є випереджувальним.

Траєкторію руху повного струму статора I_c при зміні струму збудження зображено штриховою лінією. Мінімальне значення I_c має місце при $\cos \varphi = 1$, коли повний струм дорівнює активному $I_{c \min} = I_a$.

Залежність повного струму статора I_c від струму збудження $I_{\text{об}}$ ілюструють U-подібні характеристики (рис. 5.24). Крива // зображує регульовальну характеристику двигуна $I_c(I_{\text{об}})$ при $\cos \varphi = 1$. Вона є геометричним місцем мінімумів характеристик, які відповідають різним значенням навантаження $P_1 < P_2 < P_3 < P_4$.

Ліворуч від кривої II двигун недозбуджений, праворуч — перебуджений. Крива I обмежує характеристики $I_c(I_{\phi})$ мінімально можливими струмами $I_{\phi, \min}$ за умови статичної стійкості двигунів, а крива III — характеристики $I_c(I_{\phi})$ максимально допустимими струмами $I_{\phi, \max}$ за умови допустимого нагрівання ротора двигуна.

Властивість СД регулювати споживання реактивної потужності дає змогу створювати замкнені системи керування вихідними координатами електропривода, що здійснюється відповідним вибором зворотних зв'язків. Виходячи з цього системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ) СД можуть здійснювати керування у функції:

- напруги мережі, підтримуючи постійною напругу у вузлі підмикання СД;
- підтримання реактивної потужності на постійному рівні;
- струму статора;
- активної складової струму статора;
- внутрішнього кута θ ;
- коефіцієнта потужності $\cos \varphi$.

У схемах із розімкненим керуванням СД невеликої потужності, як правило, застосовують системи релейного керування збудженням у функції напруги живлення. Така система дає можливість запобігати випаданню двигуна із синхронізму, якщо напруга знижується до значення $U_c = (0,8 \dots 0,85) U_{c, \dots}$.

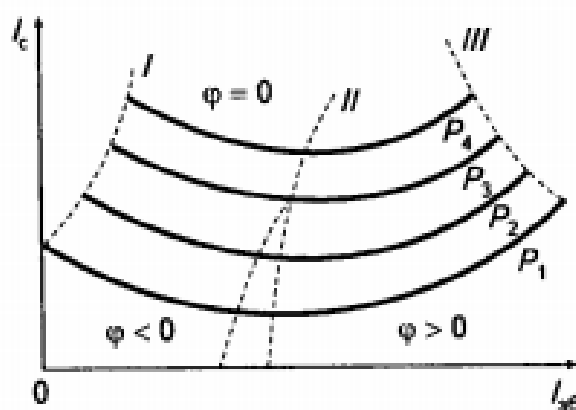


Рис. 5.24

Система збудження синхронних двигунів

Система збудження має:

- забезпечувати автоматичний пуск і синхронізацію СД;
- здійснювати форсування за струмом збудження СД із кратністю $K_\Phi \geq (1,2 \dots 1,4)$ відносно номінального струму збудження I_n при зниженні напруги живлення статора двигуна до $U_c \leq (0,8 \dots 0,85) U_{cн}$, із тривалістю форсованого режиму $t_\Phi = (10 \dots 30) \text{ с}$;
- знімати форсування при відновленні напруги живлення до $U_c \geq (0,9 \dots 0,95) U_{cн}$;
- забезпечувати захист обмотки збудження LM від перевантаження за струмом;
- забезпечувати вимикання струму збудження в разі випадання СД із синхронізму, а також при ресинхронізації двигуна;
- забезпечувати ресинхронізацію СД при втраті збудження;
- забезпечувати регулювання струму збудження в діапазоні $I_f = (0,4 \dots 1,2) I_n$ для систем, які працюють в автоматичному режимі підтримання вихідних координат ЕМС.

На діючих ЕМС із СД для живлення постійним струмом обмоток збудження LM застосовують збудники трьох основних типів: електромашинні, тиристорні і безщіткові.

У схемах з електромашинними збудниками використовують генератори постійного струму із самозбудженням. У СД із високою швидкістю обертання збудник встановлюється переважно на валу двигуна. Тихохідні СД використовують окремі установки «двигун—генератор».

На практиці застосовують три типи збудників із генераторами:

- з жорстким підмиканням збудника GM до обмотки збудження LM ;
- зі збудником GM , підімкненим до обмотки збудження LM жорстко через розрядний резистор R_p , який шунтується при підсинхронній швидкості;
- з підімкненням на час пуску до обмотки збудження LM розрядного резистора R_p і ввімкненням збудника GM до обмотки збудження LM при підсинхронній швидкості.

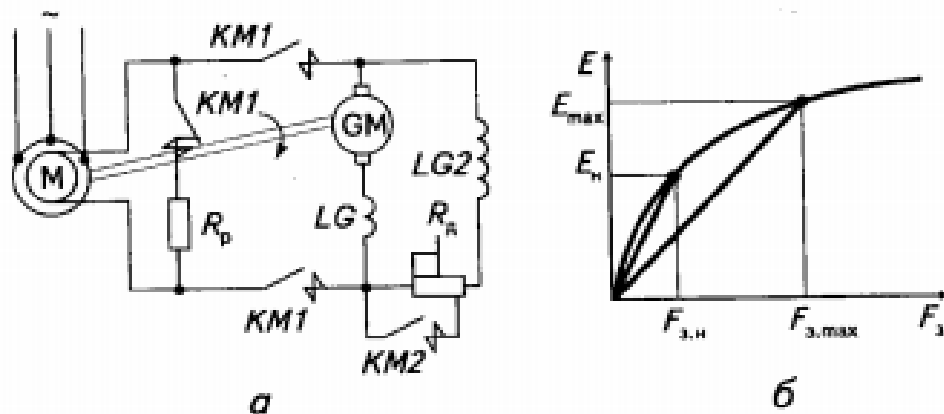


Рис. 5.25

Схему останнього типу збудників із генератором GM наведено на рис. 5.25, *а*. Генератор GM із самозбудженням приводить у рух СД. Обмотка паралельного збудження $LG2$ підімкнена до якоря генератора через регульований резистор R_d , за допомогою якого встановлюється заданий струм збудження СД. Контакттор гасіння поля $KM1$ забезпечує вимикання обмотки збудження LM від збудника GM і вмикання LM на розрядний резистор R_p . Схема передбачає також релейне форсування струму збудження, що здійснюється контактами контактора $KM2$, який шунтує частину опору резистора R_d . У результаті зростає струм збудження в обмотці $LG2$, збільшується ЕРС генератора GM (рис. 5.25, *б*), і форсоване значення струму подається на обмотку двигуна LM .

Загальними недоліками систем збудження з використанням генератора постійного струму є:

- наявність контактних елементів, передусім колектора і щіткової системи збудника;
- необхідність постійного обслуговування установки;
- висока інерційність системи збудження.

Тому, з появою статичних регульованих перетворювачів, були розроблені й успішно експлуатуються тиристорні системи збудження.

В одному з варіантів схеми *тиристорної системи збудження* (рис. 5.26) тиристорний перетворювач $VS3$, зібраний за трифазною схемою, забезпечує подання струму в обмотці LM двигуна. Розрядний резистор R_p комутується безконтактним комутатором, реалізованим на тиристорах $VS1$ і $VS2$, з'єднаних за зустрічно-паралельною

схемою. Для вимкання резистора R_p при підсинхронній швидкості напругу вмикання стабілітронів $VD2$ і $VD3$ вибирають з умови

$$U_{VD2,VD3} = k_s k_\phi U_{f_{max}}$$

де $k_s = 1,05 \dots 1,1$ — коефіцієнт запасу; k_ϕ — коефіцієнт форсування за напругою; $U_{f_{max}}$ — номінальна напруга збудження.

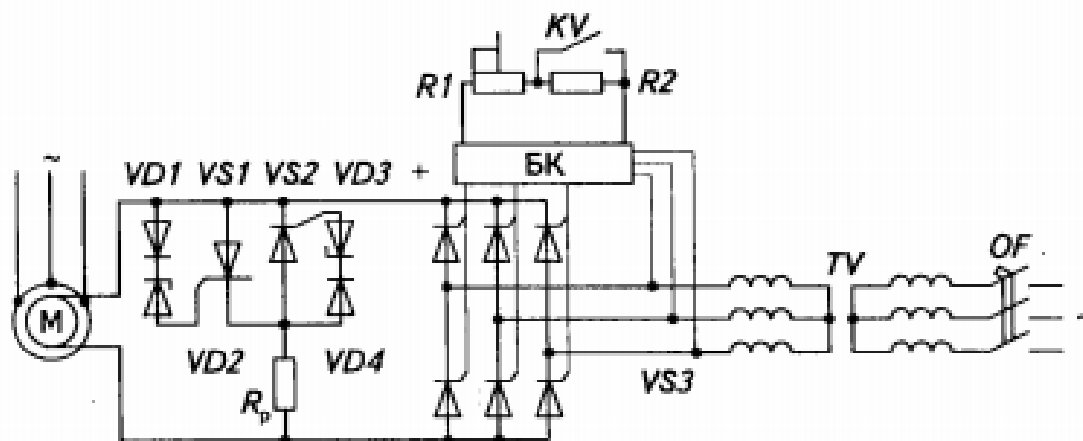


Рис. 5.26

Тиристорний збудник живиться від мережі змінного струму за допомогою узгоджувального трансформатора TV . Керує тиристорами фазоімпульсний пристрій, встановлений в блоці керування $БК$. Заданий струм збудження задається плавно або дискретно резисторами $R1$ і $R2$.

У режимах коливань напруги мережі система керування збудження передбачає подачу максимально можливого струму збудження $I_{f_{max}}$. Це здійснюється, як правило, релейним елементом (на схемі — контакти KV), що забезпечує встановлення мінімального кута відкриття α_{min} $БК$ тиристорів.

Для ЕМС із СД, які не потребують значних пускових моментів, застосовують спрощені варіанти тиристорних комутаторів. Варіант схеми з несиметричним комутатором, наведений на рис. 5.27, представляє зустрічно-паралельне з'єднання тиристора VS і діода $VD3$. Застосування такої схеми, порівняно із симетричною, призводить до несиметричної форми струму в обмотці збудження під час пуску, що незначно, на рівні 10 %, знижує пусковий момент СД.

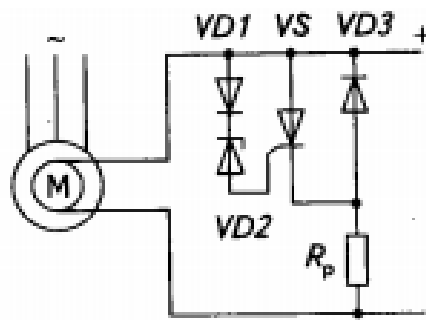


Рис. 5.27

Основним недоліком системи з тиристорними перетворювачами є те, що струм збудження подається на обмотку LM через щітки і контакти кільця ротора СД (так само, як і в системах з електромашинними збудниками). Цей недолік усунули розробкою і впровадженням в експлуатацію безщіткових систем збудження, у яких здійснюється електромагнітний зв'язок між системою керування і збудником. Це істотно поліпшило надійність системи збудження. Безщіткові системи збудження з напівпровідниковими випрямлячами, що обертаються і встановлюються в роторі СД, поділяють на синхронні та асинхронні.

В одному з варіантів схеми *безщіткового збудника* (рис. 5.28) збудником є трифазний синхронний генератор — синхронний збудник СЗ, у якого обмотка статора вмонтована в ротор синхронного двигуна, а обмотка збудження ОЗЗ живиться постійним струмом від блока керування БК.

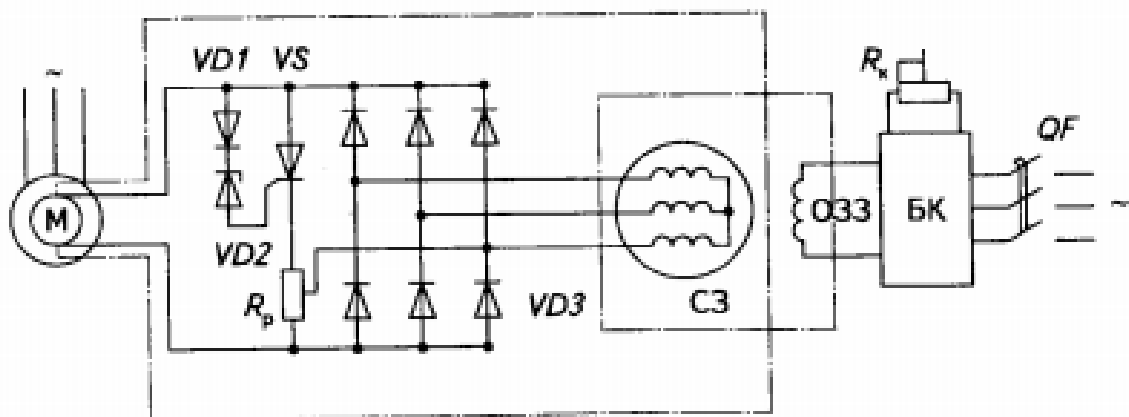
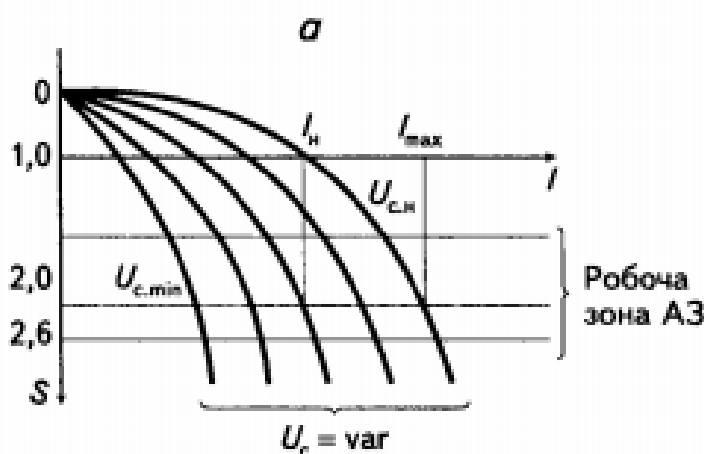
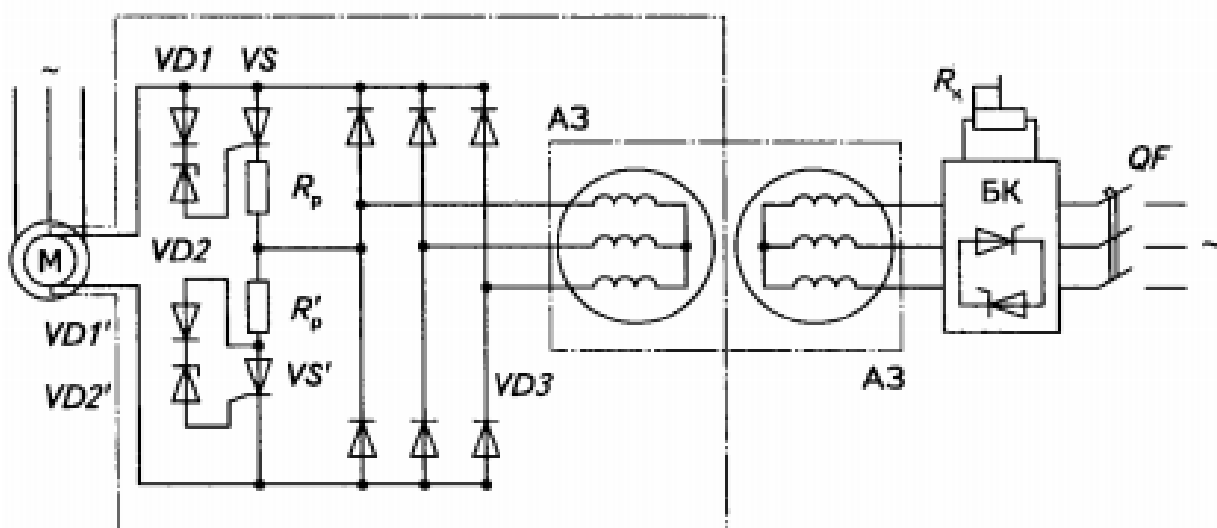


Рис. 5.28

Напряга від статора генератора СЗ випрямляється випрямлячем $VD3$, зібраним за мостовою схемою, і подається на обмотку збудження LM двигуна. На час асинхронного пуску до обмотки збудження LM безконтактним комутатором, реалізованим на тиристорі VS , підмикається розрядний резистор R_p . Оскільки під час синхронізації в момент подачі постійного струму на LM тиристор VS може бути ще не закритим, розрядний резистор R_p залишиться підімкненим до LM у робочому режимі СД. Щоб запобігти цьому, середню точку на резисторі R_p з'єднують з однією із фаз збудника СЗ. Після



б

Рис. 5.29

втягування СД у синхронізм тиристор VS закривається і резистор R_p вимикається.

Безщіткові синхронні збудники забезпечують високий коефіцієнт підсилення і не потребують значної потужності для керування. Основний недолік таких схем збудження — значна інерційність, що визначається великою кількістю витків ОЗЗ.

Більш високу швидкодію мають асинхронні безщіткові збудники АЗ, схему збудження одного з яких наведено на рис. 5.29, а. Схема складається з асинхронної машини АЗ, ротор якої вмонтовано в ротор СД. Струм збудження I , надходить із ротора АЗ через випрямляч $VD3$, зібраний за мостовою схемою. Струм збудження регулюється тиристорним регулятором напруги ТРН (БК), який живить статор асинхронного збудження. У режимі асинхронного пуску до обмотки збудження LM двигуна безконтактним комутатором, реалізованим на тиристорах VS і VS' , підмикається розрядний резистор R_p . Для отримання найменших масогабаритних показників найдоцільніше використовувати асинхронний збудник у режимі електромагнітного гальма — режим роботи в четвертому квадранті з ковзанням $s = 1,4...2,5$ (рис. 5.29, б).

Схеми керування пуском синхронних двигунів

Схему керування пуском СД з електромашинним збудником наведено на рис. 5.30. Керування пуском здійснюється у функції струму статора — реле струму KA , яке вмикає контактор гасіння поля $KM1$. У схемі передбачено форсування струму збудження в режимах зниження напруги живлення до $U_c \leq (0,8...0,85)U_{cн}$. Це здійснюється за допомогою реле напруги KV і контактора $KM2$. Також передбачений максимально струмовий захист із витримкою часу — реле струму $FA1$, $FA2$ і реле часу $KT1$. Оперативне коло захищається запобіжниками FU .

Схему керування пуском СД із тиристорним збудником наведено на рис. 5.31. Фактично оперативне коло схеми таке, як і в схемі рис. 5.30. Відмінність полягає лише в тому, що підсинхронна швидкість контролюється за допомогою частоти струму ротора — реле

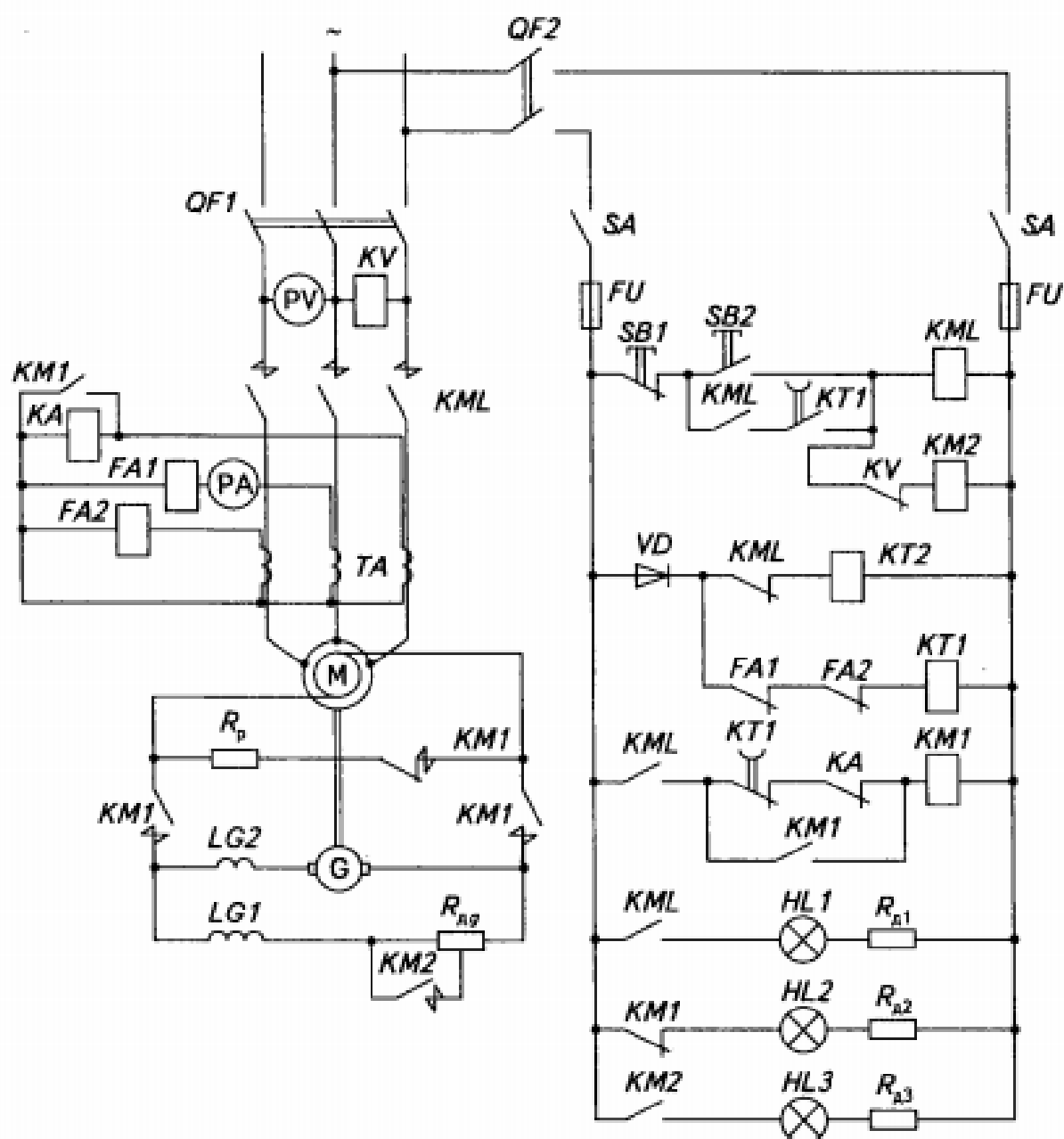


Рис. 5.30

KV1 з демпфером. Розрядний резистор R_p комутується несиметричним комутатором — тиристором *VS1* та діодом *VD1*.

Для керування тиристорами моста *VS2* використовують такі блоки: блок живлення БЖ та систему імпульсно-фазового керування СІФК.

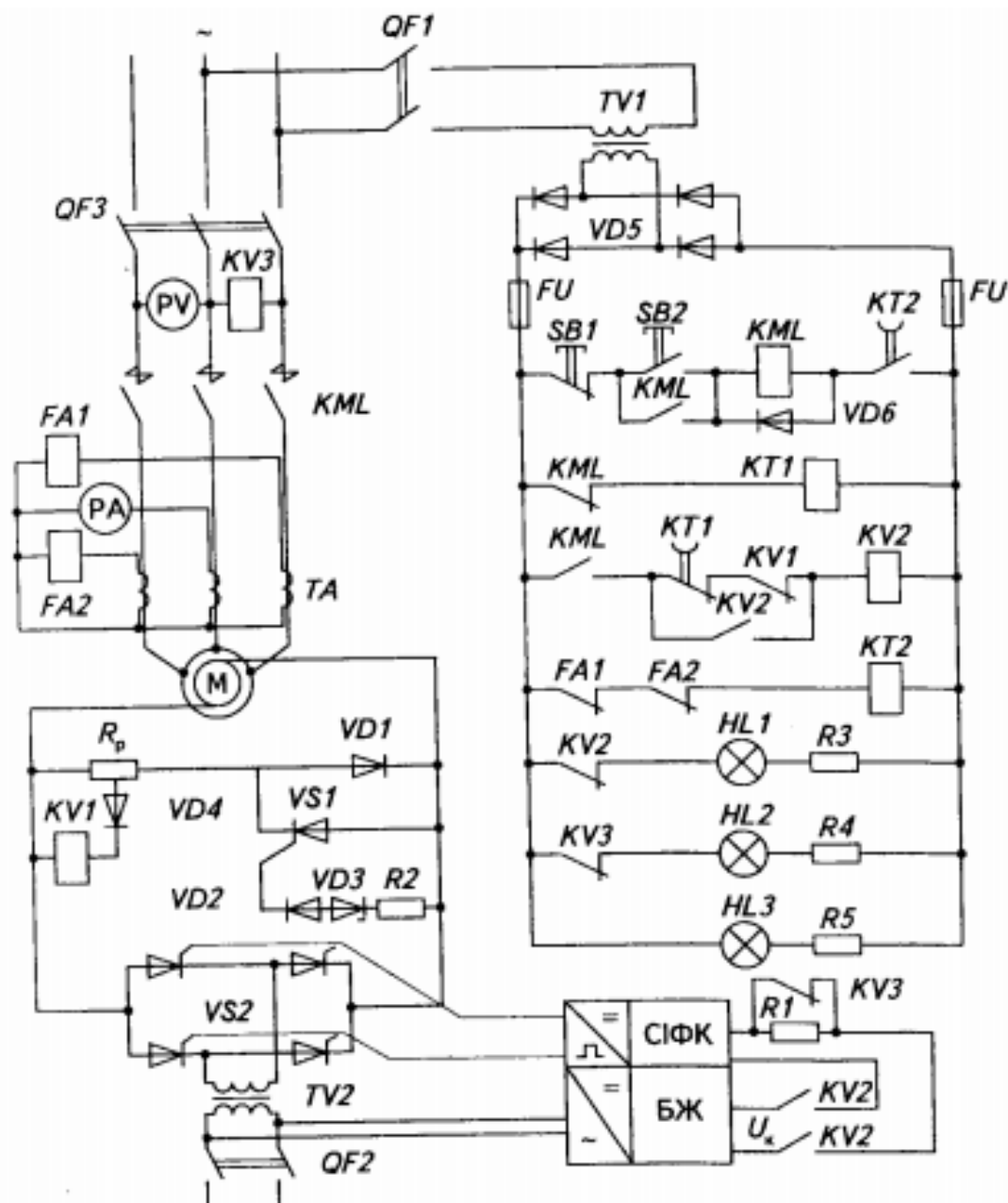


Рис. 5.31

Схему керування пуском СД (фрагмент системи) з асинхронним безщітковим збудником наведено на рис. 5.32. Напряга статора збудника регулюється тиристорним регулятором VS2. Підсинхронна швидкість контролюється у функції струму статора.

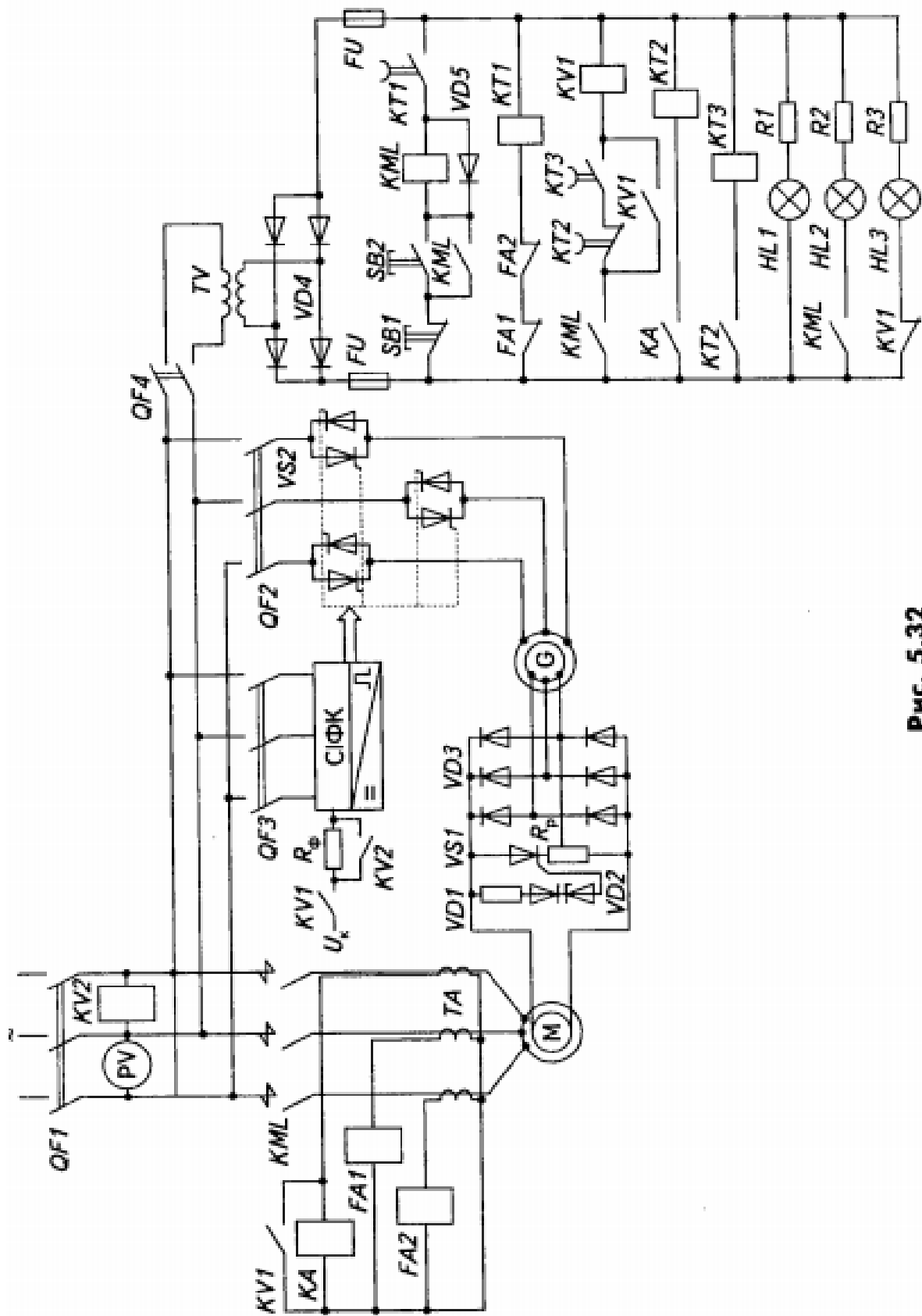


Рис. 5.32