

М.Б. Лащенко

ВЛИЯНИЕ САМОЗАПУСКА МОЩНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрены вопросы влияния самозапуска электродвигателей на систему электроснабжения. Мощные двигатели находят сейчас широкое применение в системах электропривода компрессорных, вентиляторных, насосных установок и т.д. В процессе эксплуатации они могут вызывать нарушение устойчивости режима узлов нагрузки в силу неустойчивой работы самих электродвигателей. Одним из мероприятий для обеспечения устойчивости режима и надежности электроснабжения ответственных электроустановок при кратковременных понижениях или отключениях напряжения питающей сети является самозапуск электродвигателей. Самозапуском называется процесс восстановления нормальной работы двигателей без вмешательства персонала после кратковременного отключения питающего напряжения или глубокого снижения напряжения. Он может происходить после кратковременного глубокого снижения напряжения, вследствие близкого короткого замыкания (КЗ), отключаемого релейной защитой. Восстановление питания происходит в условиях сниженной суммарной мощности источника питания. Неоправданное увеличение суммарной мощности электродвигателей, участвующих в самозапуске, может в этих условиях привести к отрицательным результатам. Любой двигатель, отключенный от источника питания, развигает при выбеге ЭДС в обмотке статора. Чем больше ЭДС, тем больше ток включения при восстановлении напряжения, который может превышать пусковой ток более чем в два раза.

Ключевые слова: самозапуск, асинхронный двигатель, синхронный двигатель, напряжение, ток, пуск двигателя, статор, релейная защита, короткое замыкание, реактивная мощность.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-134-140

На крупных горных предприятиях применяются асинхронные (АД) и синхронные (СД) электродвигатели большой единичной мощности. В процессе эксплуатации они могут вызывать нарушение устойчивости режима узлов нагрузки в силу неустойчивой работы самих электродвигателей. При этом наблюдается снижение напряжения, что может вызвать торможение (опрокидывание) у АД и выпадение из синхронизма у СД.

Контроль напряжения в электрической сети имеет важное значение для правильной работы электротехнического оборудования в целях предотвращения повреждений, такие как перегрев,

чтобы снизить потери при передаче и для поддержания способности системы противостоять спаду напряжения [1].

Для обеспечения устойчивости режима и надежности электроснабжения ответственных электроустановок при кратковременных понижениях или отключениях напряжения питающей сети используется самозапуск электродвигателей.

При отключении напряжения питания наступает режим свободного или группового (если в самозапуске будут участвовать несколько двигателей) выбега. Продолжительность перерывов должна быть такой, чтобы к моменту восстановления питания частота вращения самозапу-

скаемых двигателей была больше нуля, а значение остаточного напряжения на зажимах электроприемников такой, чтобы вращающий момент электродвигателей превышал статический момент сопротивления механизмов.

В этих целях приходится в режиме самозапуска оставлять включенными только часть электродвигателей наиболее ответственных механизмов. Электродвигатели, самозапуск которых недопустим по условиям технологии или техники безопасности, обязательно должны отключаться защитой [2].

Во всех случаях необходимость процесса самозапуска должна быть обоснованной. Его следует применять только для тех механизмов и двигателей, для которых он действительно необходим. Нужно учитывать, что нередко восстановление питания после его аварийного прекращения происходит в условиях сниженной суммарной мощности источника питания (например, при аварийном отключении одного из двух вводов подстанции и автоматическом переводе всей ее нагрузки на другой ввод), (рис. 1).

Самозапуск группы электродвигателей может быть облегчен уменьшением мощности двигателей, участвующих в самозапуске, путем секционирования шин

распределительного устройства, питающегося от одного ввода [3]. Самозапуск электродвигателей имеет несколько принципиальных отличий от пуска:

1. В момент восстановления напряжения все двигатели или их значительная часть вращаются. При этом угловая скорость обеспечивает повышенный момент вращения двигателя в начале самозапуска по сравнению с пуском (при том же напряжении).

2. При отключении от сети одного или группы двигателей на шинах подстанции растет остаточная ЭДС и при этом ток включения двигателя может превышать пусковой ток более чем в 2 раза.

3. При самозапуске включается одновременно группа двигателей, в результате чего в сети и ее элементах растут токи, снижается напряжение на зажимах электродвигателей, что приводит к уменьшению вращающего момента.

4. Самозапуск происходит, как правило, при нагруженных технологических установках, что приводит к увеличению длительности разгона, а это вызывает повышение температуры обмоток двигателей из-за увеличения тока по сравнению с его номинальным значением.

Принципиальное отличие самозапуска синхронных двигателей от самозапуска

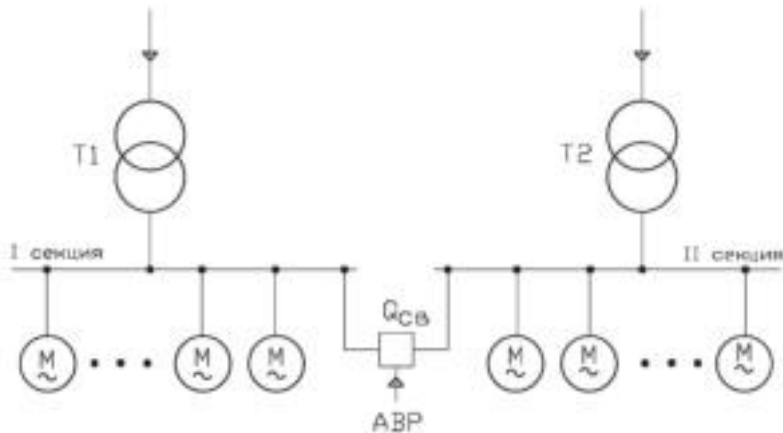


Рис. 1. Схема подстанции с АВР на секционном выключателе $Q_{св}$ сборных шин

Fig. 1. Layout of substation with automatic transfer circuit breaker on section switch Q_{ss} of collecting buses

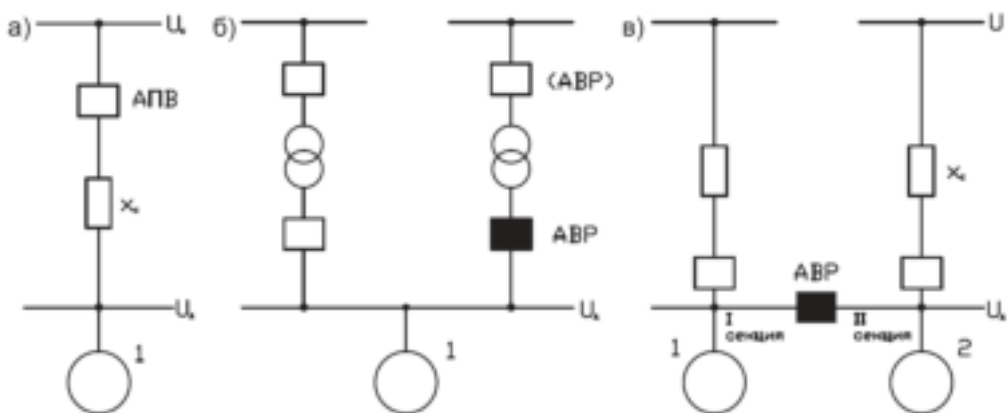


Рис. 2. Варианты самозапуска электродвигателей: АПВ в энергосистеме (а); АВР трансформатора (б); АВР на секционном выключателе (в); 1 — двигатели, участвующие в самозапуске; 2 — нагрузка II секции при самозапуске двигателей I секции

Fig. 2. Variants of electric motor self-starting: autoreclosing in electric system (a); automatic transfer circuit breaker of transformer (b); automatic transfer circuit breaker on section switch (c); 1 — self-starting motors; 2 — load in section II under self-starting of motors in section II

асинхронных двигателей заключается в необходимости у СД возбуждения [4].

Всякий двигатель, отключенный от источника питания, развивает при выбеге в обмотке статора ЭДС. У асинхронных двигателей ЭДС невелика, а у синхронных весьма значительна: чем больше ЭДС, тем больше ток включения при восстановлении напряжения. С этой точки зрения желательно отдалить время восстановления напряжения, т.е. увеличить время действия АВР [5].

На практике часто требуется определение наибольшей суммарной мощности двигателей, которые могут одновременно участвовать в самозапуске [6].

Для этого определяется скольжение s_3 , до которого затормаживаются двигатели за время перерыва питания. Затем, исходя из характеристик момента сопротивления механизма и вращающего момента двигателя, определяют напряжение, при котором в начале разгона момент двигателя будет превышать момент сопротивления

$$U_A = \sqrt{m_{ac,U} / m_{ac,3}} \geq \sqrt{m_c / m_{ac,3}},$$

где $m_{ac,U}$ — требуемая кратность момента двигателя при скольжении s_3 ; $m_{ac,3}$ — кратность момента двигателя при номинальном напряжении и скольжении.

Предполагается, что двигатель успеет остановиться. Тогда $m_{ac,3} = m_n$, $m_c = m_{тр}$.

Находится суммарная пусковая мощность двигателей с обеспеченным самозапуском

$$P_{п,з} = \frac{S_6 U_{ном}^2}{x_3 U_6^2},$$

где x_3 — сопротивление, отн. ед; S_6 — базовая мощность, МВ · А; U_6 — базовое напряжение, кВ.

В пределах найденной мощности выбираются электродвигатели наиболее ответственных потребителей. Остальные потребители должны быть автоматически отключены. Отключенные электродвигатели могут либо участвовать в самозапуске второй ступени, либо быть включены персоналом.

Если в самозапуске участвуют все двигатели, т.е. отсутствует секция шин, на которой электроснабжение не нарушалось (рис. 2, а, б), то максимальная неотключаемая мощность двигателей, кВт, равна

$$P_{\text{д.маx}} = \frac{\eta_{\text{ном}} S_6 \cos\varphi}{k x_c} \left(\frac{U_c}{U_A} - 1 \right),$$

где $\eta_{\text{ном}}$, $\cos\varphi$ — средневзвешенные номинальные КПД и коэффициент мощности двигателей; U_A — требуемое напряжение двигателя; k — кратность пускового тока.

Формулы U_A и $P_{\text{д.маx}}$ справедливы для асинхронных и невозбужденных синхронных двигателей, участвующих в самозапуске.

Если отключившаяся секция I (рис. 2, в) с помощью АВР на секционном выключателе подключается к секции II, имеющую свою нагрузку, то неотключаемая мощность на секции I составит

$$P'_{\text{д.маx}} = \frac{\eta_{\text{ном}} \cos\varphi}{k} \left[\left(\frac{U_c}{P_{\text{д.маx}}} - 1 \right) \frac{S_6}{x_c} - Q_H \right],$$

где Q_H — реактивная мощность, потребляемая нагрузкой, квар.

Из $P'_{\text{д.маx}}$ следует, что если на неотключающейся секции II имеются синхронные двигатели, то целесообразно использовать их форсировку возбуждения. При опережающем коэффициенте мощности реактивная мощность Q_H отрицательна и при увеличении ее абсолютного значения $P'_{\text{д.маx}}$ увеличивается. Наличие на неотключающейся секции конденсаторной батареи облегчает условия самозапуска, однако выработка реактивной мощности неблагоприятно влияет на ток включения.

В некоторых случаях самозапуск скачивается на тепловой нагрузке кабелей и других параметрах сети [7].

Самозапуск в ряде случаев влияет на работу релейной защиты, в связи с чем могут предъявляться соответствующие требования к ее расчету и схемам.

Максимальная токовая защита действует при повреждениях не только на защищаемом участке, но и при внешних КЗ, резервируя защиту последующего

участка, если считать от источника питания. Токовые реле, сработавшие при внешнем КЗ, должны надежно возвращаться в исходное положение после отключения КЗ соответствующей защитой и снижения тока до максимального тока нагрузки.

Например, при КЗ в точке К (рис. 3, а) сработают токовые реле защит 1 и 2. После отключения повреждения защитой 2 прохождение тока КЗ прекращается и пришедшие в действие токовые реле защиты 1 должны возвратиться в исходное положение, так как иначе защита 1 ложно отключит свою линию. Поэтому ток возврата защиты 1 должен быть больше тока нагрузки, проходящего в линии, на которой эта защита установлена.

Ток нагрузки после отключения КЗ будет выше из-за наличия тока самозапуска двигателей, подключенных к подстанции Б, которые успели затормозиться вследствие глубокого снижения напряжения из-за КЗ. Характер изменения тока и напряжения в описанном процессе изображен на рис. 3, б, в. Увеличение тока при самозапуске по сравнению с максимальным рабочим током $I_{\text{р.маx}}$ учитывается коэффициентом запуска $k_3 = I_3 / I_{\text{р.маx}}$, и тогда первичный ток срабатывания защиты, А, равен

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_H k_3}{k_B} I_{\text{р.маx}} = \frac{k_H}{k_B} I_3'' ,$$

где k_H — коэффициент запаса (надежности), равный 1,1–1,2; k_B — коэффициент возврата защиты.

Токовая отсечка настраивается на отключение токов близких КЗ $I_{\text{к}}''$. Если ток включения при самозапуске I_3'' соизмерим с ним, то при восстановлении электроснабжения возможно ложное срабатывание защиты. Для предотвращения ложного срабатывания ток срабатывания отсечки $I_{\text{с.о}}$ должен находиться в пределах

$$I_{\text{к}}'' > I_{\text{с.о}} > k_y I_3'' ,$$

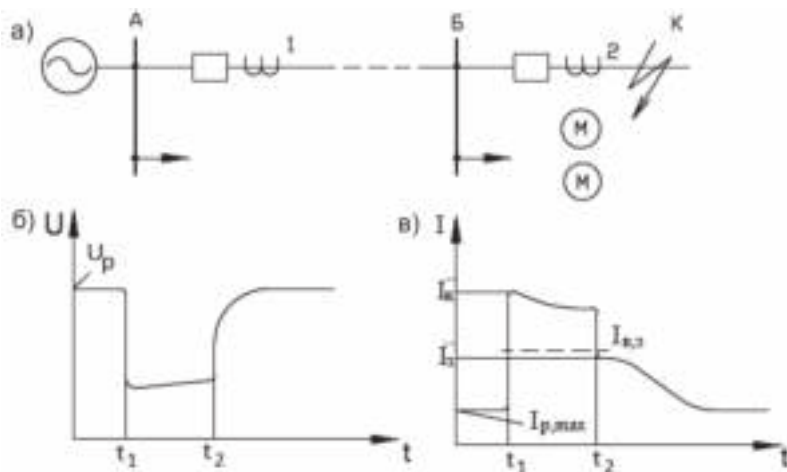


Рис. 3. Влияние самозапуска на работу максимальной токовой защиты: схема (а); напряжение на шинах А при КЗ в точке К (б); ток защиты при КЗ на точке К (в); t_1 — момент возникновения КЗ; t_2 — момент отключения тока КЗ защитой 2; $I_{в.з}$ — ток возврата защиты

Fig. 3. Effect of self-starting on maximum current protection efficiency: layout (a); voltage on buses A under short circuit at point K (b); protection current under short circuit at point K (c); t_1 — short circuit moment; t_2 — time of short circuit current interruption by protection 2; I_{pr} — protection recovery current

где k_y — ударный коэффициент учитывающий влияние апериодической слагающей, принимается как и при расчете тока КЗ ($2 > k_y > 1$).

Защита асинхронных двигателей при самозапуске принципиальных изменений не требует. Защита синхронных двигателей от асинхронного хода требует выдержки времени, достаточной для обеспечения разгона и вхождения в синхронизм в процессе самозапуска.

Уставка защиты минимального напряжения наиболее ответственных электродвигателей принимается, как правило, $U_{3.U1} \approx 0,25$ В. Выключатели всех остальных электродвигателей оборудуются защитой минимального напряжения в обязательном порядке. Уставка по времени защиты минимального напряжения двигателей, участвующих в самозапуске второй ступени, $t_{3.U2}$ должна быть не больше значений, не создающих помех для разгона двигателей первой ступени после восстановления напряжения.

Применение самозапуска предъявляет дополнительные требования к выполнению и устройств автоматики. Если

в самозапуске участвуют только асинхронные и невозбужденные синхронные двигатели, то устройства АПВ выполняются обычным образом. При наличии возбужденных синхронных двигателей, если ток включения выше допустимого, применяют одну из схем гашения поля, либо увеличивают выдержку времени действия АПВ. Время срабатывания АПВ на выключателях электродвигателей, участвующих в самозапуске второй и последующих ступеней, должно быть достаточным для обеспечения разгона двигателей, участвующих в самозапуске предыдущей ступени [8].

Заключение

Самозапуск электродвигателей необходим для обеспечения устойчивости режима узлов нагрузки и надежности электроснабжения. Если повреждение быстро устранено, то при обеспеченном самозапуске это не является аварией или браком в работе СЭС. При расчетах самозапуска на предприятии необходимо учитывать влияние самозапуска на электрическую сеть, так как самозапуск

происходит при сниженной суммарной мощности источника питания; появление при выбеге остаточной ЭДС на шинах подстанции, что приводит к увели-

чению пускового тока более чем в два раза; а также самозапуск может оказывать влияние на тепловую нагрузку кабелей и другие параметры работы сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jignesh Parmar Importance of Reactive Power of System. OAK Ridge National Laboratory, 2011.
2. Пивняк Г.Г., Винославский В.Н., Рыбалко А.Я., Несен Л.И. Переходные процессы в системах электроснабжения. Учебник для вузов. — Киев: Выща школа, 2003. — С. 391–394.
3. Эрнст А.Д. Самозапуск асинхронных двигателей. Учебное пособие. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. — С. 11–12.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — С. 204–205.
5. Лопато Д.С. Общая характеристика самозапуска. — М.: Изд-во НИЯУ «МИФИ», 2015.
6. Seok-Cheol Hong. Self-Starting Electric Motor // Physics Teacher, 2009, 47(4), pp. 204–205.
7. Haselier P., Zimmermann W. Wiederanlauf von asynchronmotoren nach netzfehlern // Metallweiterverarbeitung, 1981, 19, no 4, pp. 291–292.
8. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — С. 107–117.
9. Эрнст А.Д. Самозапуск синхронных двигателей. Учебное пособие. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. — 65 с.
10. Ершов А.В. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Курс лекций. — Красноярск, 2012. — 91 с.
11. Михалев С.В. Система поддержания устойчивости работы синхронных электродвигателей 6–10 кВ: Дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — 121 с.
12. Михалев С.В. Математическая модель для оценки устойчивости синхронных электродвигателей при кратковременной потере питания / Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 июля 2013 г.: в 5 частях, Ч. 3. — Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. — С. 99–103. **ПАВ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Лашченков Михаил Борисович — аспирант, НИТУ «МИСиС», e-mail: mixan9524@gmail.com.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2019. No. 1, pp. 134–140.

Effect of self-starting of high-power motors on power supply system

Lashchenov M.B., Graduate Student, e-mail: mixan9524@gmail.com,
National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Abstract. The article discusses influence of self-starting of electric motors on power supply system. High-power motors are currently widely used in electrical drive systems of compression, ventilation and pumping plants, etc. When in service, motors can cause instability of load centers due to unstable operation. One of the measures aimed to ensure stable operation mode and fault-free power supply of critical electric installations under short-term undervoltage or de-energization of mains is self-starting of electric motor. Self-starting is the recovery of normal operation mode of motors without assistance of personnel after short-term blackout or low undervoltage. Self-starting comes to action after short-term low undervoltage due to nearby fault switched off by guard relay. Restoration of power supply takes place under reduced aggregate capability of power source. An unreasonable increase in the aggregate capability of self-starting electric motors can bring negative results in this case. Any de-energized motor develops electromotive force in stator winding during rundown operation. With increasing electromotive force, the voltage recovery current grows and can exceed starting current more than two times.

Key words: self-starting, asynchronous motor, synchronous motor, voltage, current, motor starting, stator, guard relay, short circuit, wattless power.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-134-140

REFERENCES

1. Jignesh Parmar. *Importance of Reactive Power of System*. OAK Ridge National Laboratory, 2011.
2. Pivnyak G. G., Vinoslavskiy V. N., Rybalko A. Ya., Nesen L. I. *Perekhodnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya*. Uchebnik dlya vuzov [Transition processes in power supply systems. Textbook for high schools], Kiev, Vyscha shkola, 2003, pp. 391–394.
3. Ernst A. D. *Samozapusk asinkhronnykh dvigateley*. Uchebnoe posobie [Self-starting of asynchronous motors. Educational aid], Omsk, Izd-vo OmGTU, 2006, pp. 11–12.
4. Syromyatnikov I. A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley*. Uchebnik dlya vuzov [Operating modes of asynchronous and synchronous motors. Textbook for high schools], Moscow, Energoatomizdat, 1984, pp. 204–205.
5. Lopato D. S. *Obshchaya kharakteristika samozapuska* [Description of self-starting], Moscow, Izd-vo NIYAU «MIFI», 2015.
6. Seok-Cheol Hong. Self-Starting Electric Motor. *Physics Teacher*, 2009, 47(4), pp. 204–205.
7. Haselier P., Zimmermann W. Wiederanlauf von asynchronmotoren nach netzfehlern. *Metallweiterverarbeitung*, 1981, 19, no 4, pp. 291–292.
8. Golodnov Yu. M. *Samozapusk elektrodvigateley*. Uchebnik dlya vuzov [Self-starting of electric motors. Textbook for high schools], Moscow, Energoatomizdat, 1985, pp. 107–117.
9. Ernst A. D. *Samozapusk sinkhronnykh dvigateley*. Uchebnoe posobie [Self-starting of synchronous motors. Educational aid], Omsk, Izd-vo OmGTU, 2009, 65 p.
10. Ershov A. V. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya elektroenergeticheskikh sistem*. Kurs lektsiy [Relay protection and automation of electric power systems. Course of lectures], Krasnoyarsk, 2012, 91 p.
11. Mikhalev S. V. *Sistema podderzhaniya ustoychivosti raboty sinkhronnykh elektrodvigateley 6–10 kV* [System for steady operation maintenance in synchronous electric motors of 6–10 kV], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGETU «LETI», 2014, 121 p.
12. Mikhalev S. V. *Matematicheskaya model' dlya otsenki ustoychivosti sinkhronnykh elektrodvigateley pri kratkovremennoy potere pitaniya* [Mathematical model for estimating stability of synchronous electric motors under short-term de-energization]. *Sovremennoe obshchestvo, obrazovanie i nauka: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 31 July 2013, Tambov, part 3. Tambov, Izd-vo TROO «Biznes-Nauka-Obshchestvo», 2013, pp. 99–103. [In Russ].



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

S-ОБРАЗНАЯ ФУНКЦИЯ ПОТЕНЦИАЛА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

(№ 1169/01–19, № 1170/01–19, № 1171/01–19 от 06.11.2018; 9 с.)

Зюзин Борис Федорович¹ — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: zbfu@yandex.ru,

Жигульская Александра Ивановна¹ — кандидат технических наук, доцент,

Юдин Сергей Алексеевич¹ — преподаватель-исследователь,

¹ Тверской государственный технический университет.

Рассмотрены геометрические модели представления напряженно-деформированного состояния горных пород. Определен характер S-образной функции развития деформационных процессов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, S-образная функция, модели прогнозирования развития.

S-SHAPED CAPACITY FUNCTION STRESSED DEFORMED CONDITION MOUNTAIN BREEDS

Zyuzin B.F.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, e-mail: zbfu@yandex.ru,

Zhigul'skaya A.I.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

Yudin S.A.¹, Teacher-Researcher,

¹ Tver State Technical University e-mail: common@tstu.tver.ru, 170026, Tver, Russia.

Geometric models of the stress-strain state of rocks are considered. The nature of the S-shaped function of the development of deformation processes is determined.

Key words: stress-strain state, S-shaped function, development fore-casting models.