

УДК 62-83(075.8):621.39:62-82(031)

Быстродействующее устройство автоматического ввода резерва для высоковольтных асинхронных двигателей и гидравлический удар

М. Ю. Пустоветов

(Донской государственный технический университет)

Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования автоматического ввода резерва при питании мощных высоковольтных асинхронных двигателей водяных насосов. Выявлено существование более и менее благоприятных длительностей паузы питающего напряжения с точки зрения характеристик гидроудара.

Ключевые слова: быстродействующее устройство автоматического ввода резерва, асинхронный двигатель, ультравысоковольтный однооперационный тиристор, напор, гидроудар.

Введение. Автоматический ввод резерва (АВР) предусматривается на всех подстанциях, питающих потребителей I категории. Действие АВР осуществляется в пределах 0,2...1,0 с после исчезновения напряжения на контролируемых шинах 6...10 кВ [1]. Быстродействующим АВР (БАВР) называют устройство, обеспечивающее включение резервного питания за время не более 0,1 с. Устройства БАВР могут быть реализованы на базе быстродействующих выключателей с электромагнитным приводом [2]. Наивысшее быстродействие обеспечивают тиристорные устройства АВР (ТАВР) [3]. Максимизация быстродействия АВР в случае питания мощных высоковольтных асинхронных двигателей (АД) связана со стремлением получить более лёгкие условия переходного процесса при восстановлении напряжения на АД. Чем меньше будет длительность бестоковой паузы на АД, тем меньшим будет снижение частоты вращения, выше остаточное напряжение (генерируемая ЭДС) на клеммах АД, как следствие — меньший ток включения. С увеличением быстродействия АВР АД, приводящих насосы по перекачке жидкостей, ожидают также снижения вероятности возникновения и силы гидроударов. Это следует из соотношения [4]:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2, \quad (1)$$

где H , м — напор; ω , рад/с — частота вращения АД, приводящего насос; индексы 1 и 2 обозначают принадлежность к разным режимам работы.

Проблема гидроударов в трубопроводах особенно важна для ответственных технологических процессов с использованием крупных двигателей. К таким можно отнести насосные станции для перекачивания различных жидкостей: водоканал, нефтехимические предприятия.

Статья посвящена проблеме уменьшения действия гидравлического удара за счёт использования ТАВР. На основании результатов расчётов демонстрируется наличие нелинейной зависимости скорости относительного изменения напора, создаваемого насосом в результате восстановления напряжения на АД, от длительности паузы питающего напряжения.

Объект моделирования. Компьютерная модель. В общих чертах объект моделирования соответствует схеме устройства ТАВР, представленной в [5]. Логика работы компьютерной модели следующая. В условиях установившегося близкого к номинальному режима работы АД с насосной нагрузкой производится одновременное размыкание всех трёх фаз питания с выдержкой паузы напряжения, в течение которой АД работает в режиме выбега, постепенно снижая скорость вращения и остаточное напряжение (генерируемую ЭДС) на клеммах фаз. Моделирование проводилось для длительностей паузы напряжения от 0,02 до 0,1 с. По истечении времени паузы производится одновременная подача сигнала на отпирание всех полупроводниковых приборов в тири-

сторных ключах фаз. Принципиальная схема тиристорного ключа показана на рис. 1: два тиристора включены встречно-параллельно. Задано, что ключи обеспечивают проводимость питающих линий (собственно операцию АВР) в течение 0,08 с. Подразумевается, что одновременно с подачей команды на отпирание полупроводниковых приборов начата операция замыкания электромеханических ключей всех фаз, расположенных в схеме параллельно тиристорным ключам. Предполагается, что время срабатывания электромеханического ключа составляет 0,07 с. Операция его замыкания имитируется в модели замыканием идеализированного ключа в момент времени, рассчитываемый как момент времени окончания паузы напряжения плюс 0,07 с. Таким образом, команда на запирающие тиристорных ключей поступает позже, чем замкнутся идеализированные ключи в модели. Задано, что основной и резервный ввод точно сфазированы.

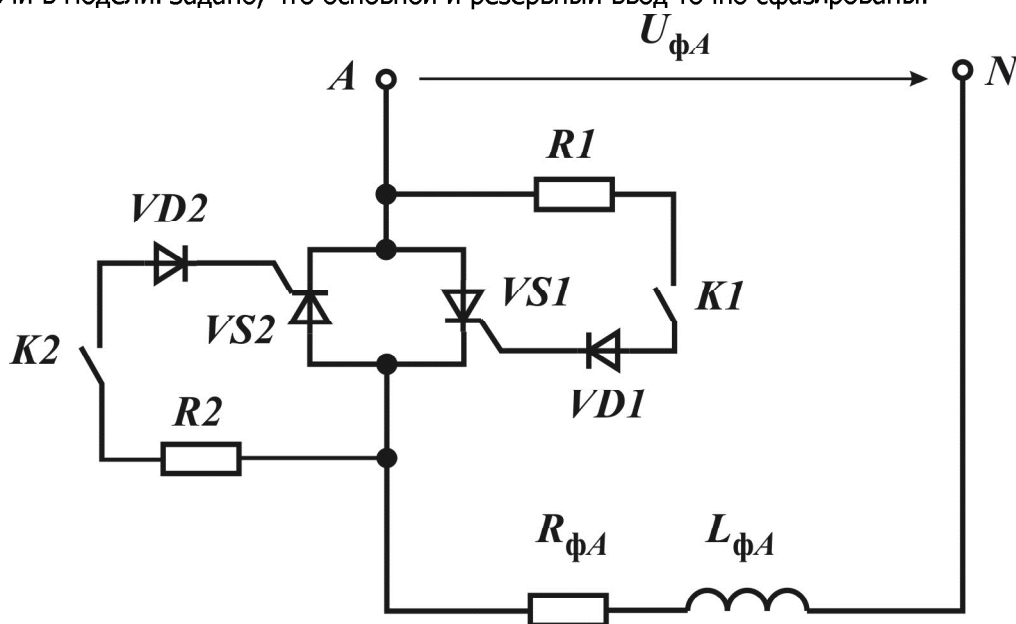


Рис. 1. Схема тиристорного ключа (на примере фазы А АД)

В качестве АД для моделирования взяты трёхфазные четырёхполюсные моторы с короткозамкнутым ротором мощностью 250, 630 и 800 кВт на 6 кВ линейного напряжения. В имитационную модель АД [6] подставлены значения параметров, вычисленные согласно [7]. Нагрузка (насос) смоделирована согласно [8]. С точки зрения механики моделируется жёсткая одномассовая система. В качестве тиристора, применимого для устройства ТАВР, выбран однооперационный ультравысоковольтный тиристор фирмы *Mitsubishi* марки *FT 1500AU-240* на напряжение 12000 В и средний ток в открытом состоянии 1500 А. Моделирование тиристора осуществлено согласно рекомендациям [9].

Результаты моделирования. Результаты моделирования для длительности паузы напряжения 0,03 с и момента инерции, приведённого к валу АД, равного 130 % от момента инерции ротора АД мощностью 630 кВт, показаны на рис. 2. Интерес представляет то обстоятельство, что при относительно незначительном снижении частоты вращения ротора АД (на рис. 2, б всего на 3,7 %), бросок его электромагнитного момента при восстановлении напряжения превышает броски при пуске из неподвижного состояния. Как следствие, максимальное перерегулирование частоты вращения АД также достигается после восстановления напряжения, а не при пуске из неподвижного состояния.

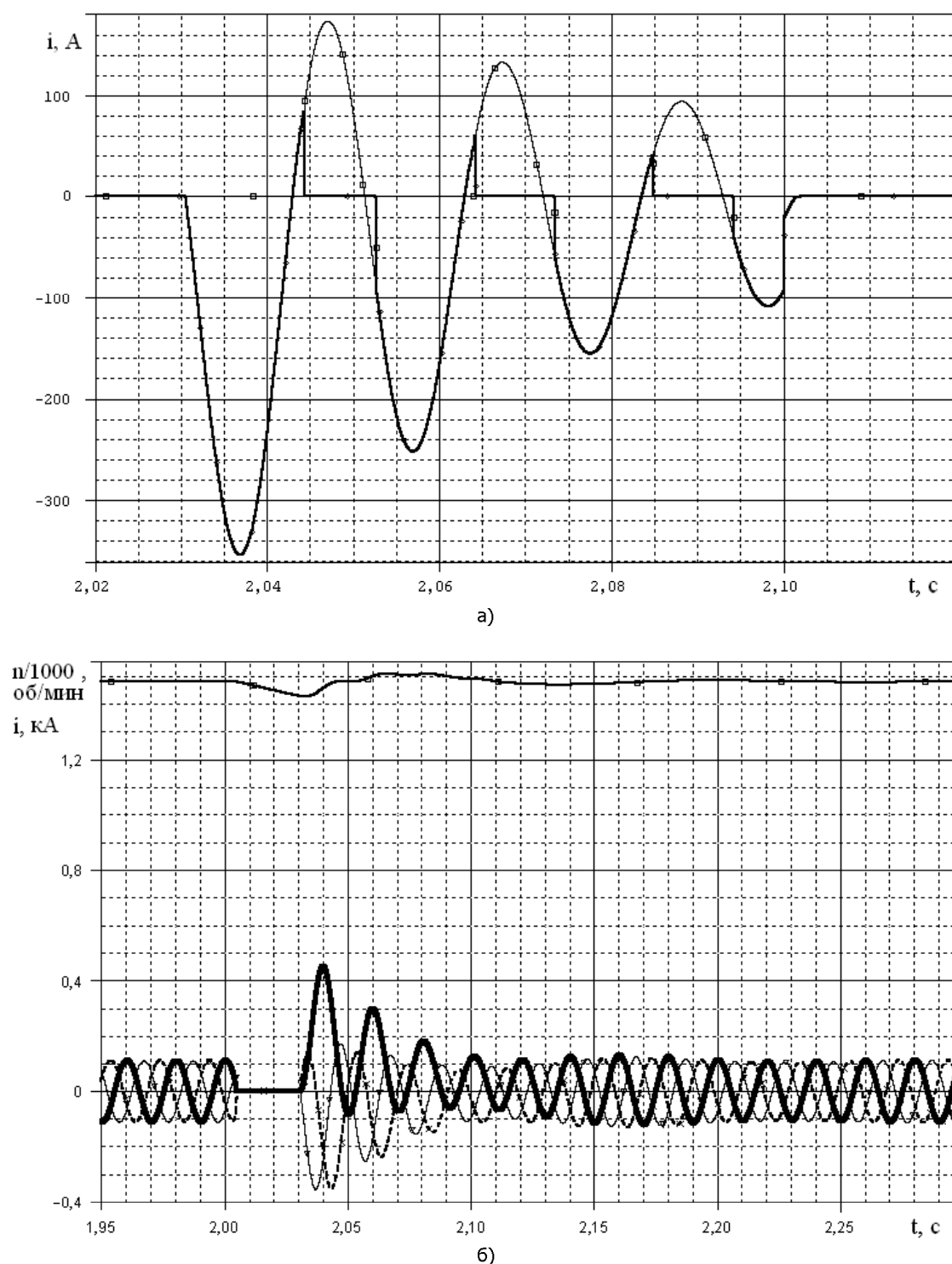


Рис. 2. Результаты моделирования: токи через тиристорный ключ фазы А при работе ТАВР (а); частота вращения АД (верхняя кривая), фазные токи АД до и после паузы напряжения (б)

О гидроударе. Согласно [10], гидравлическим ударом называют явление резкого изменения давления в напорном трубопроводе при внезапном изменении скорости движения жидкости, например, из-за быстрой остановки или пуска насоса. Так как давление и напор связаны прямой пропорциональной зависимостью, то можно говорить о резком изменении напора.

Интерес представляют полученные в ходе обработки результатов ряда расчётных экспериментов данные о скоростях относительного изменения напора, создаваемого насосом, в результате отключения напряжения АД и восстановления напряжения на АД. Эти данные могут быть полезны для суждений о возможности и силе гидравлических ударов.

Если известен момент достижения минимума частоты вращения АД в результате паузы напряжения $t(\omega_{\min})$ и момент достижения максимума частоты вращения АД после восстановления напряжения в результате операции АВР $t(\omega_{\max})$, а также момент начала паузы напряжения t_0 , то скорость относительного изменения напора в результате восстановления напряжения на АД:

$$\frac{\Delta \dot{H}_B}{\Delta t_1} = \left(\frac{H(\omega_{\max}) - H(\omega_{\min})}{H(\omega_{уст})} \right) / (t(\omega_{\max}) - t(\omega_{\min})); \quad (2)$$

скорость относительного изменения напора в результате снятия напряжения с АД

$$\frac{\Delta \dot{H}_C}{\Delta t_2} = \left(\frac{H(\omega_{уст}) - H(\omega_{\min})}{H(\omega_{уст})} \right) / (t(\omega_{\min}) - t_0), \quad (3)$$

где $\omega_{уст}$ — установившаяся частота вращения АД до отключения напряжения.

Графики зависимостей, полученных по выражениям (2) и (3) для АД мощностью 250, 630 и 800 кВт в условиях момента инерции, приведённого к валу АД, равного 130 % от момента инерции ротора АД, представлены на рис. 3—5.

Результаты моделирования будут несколько иными при других моментах инерции системы «двигатель — насос»: мигрируют точки максимума и минимума на графике $\Delta \dot{H}_B / \Delta t_1$, но сохраняется его характерная форма. С ростом момента инерции при прочих равных условиях уменьшаются изменения частоты вращения и напора. Проведённые вычислительные эксперименты показали нечувствительность результатов к фазе напряжения сети.

Минимизация времени срабатывания АВР ведёт к снижению $\Delta \dot{H}_B / \Delta t_1$, но следует учитывать наличие времени на распознавание аварийной ситуации на основном вводе, времени на использование того или иного способа, позволяющего возможно точнее сфазировать АД на выбеге с напряжением резервного ввода, что на практике может увеличить длительность паузы напряжения.

Для условий рис. 4 следует отметить, что $\Delta \dot{H}_B / \Delta t_1$, рассчитанная для процесса пуска из неподвижного состояния, составила всего 1,079 о.е./с. Это существенно ниже любой точки соответствующего графика на рис. 4.

Как и ожидалось, с ростом длительности паузы напряжения на АД монотонно возрастает амплитуда наибольшего ударного тока фазы при восстановлении напряжения. Для АД мощностью 630 кВт пик фазного тока в процессе пуска из неподвижного состояния не превышает 972,5 А, что меньше максимального значения на рис. 4.

Вопрос о напряжении на клеммах АД в случае, когда тиристорные ключи находятся в запертом состоянии, а АД не включён, то есть за счёт токов утечки через тиристоры, также исследовался на модели. Для АД мощностью 630 кВт величина действующего значения напряжения составила около 45 В при токе утечки порядка единиц мА.

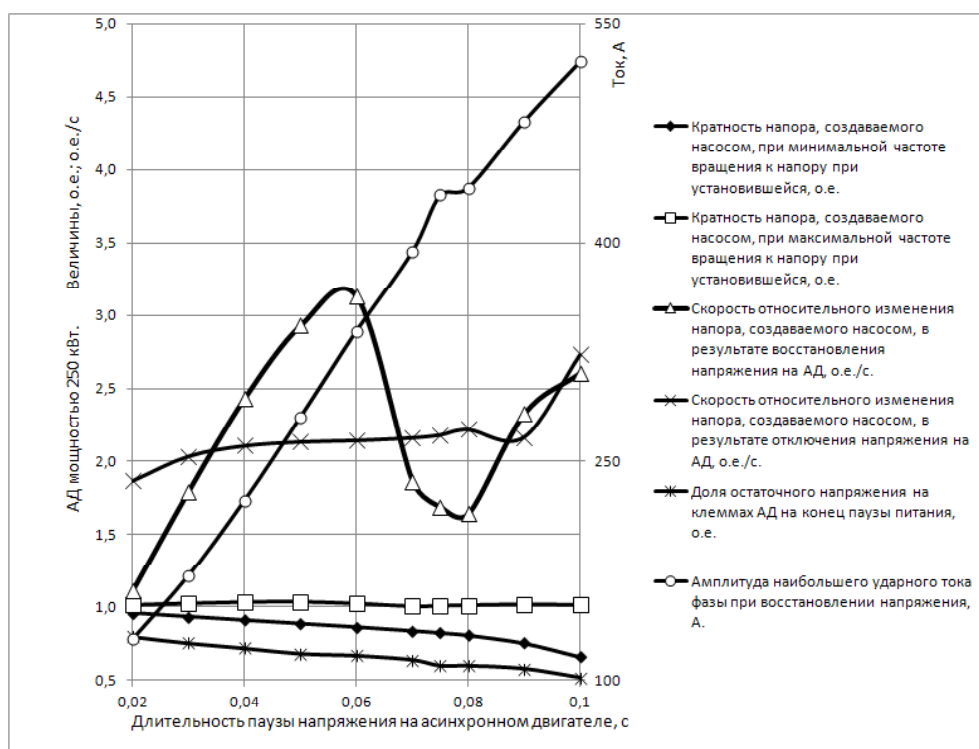


Рис. 3. Зависимости, полученные при моделировании АВР АД мощностью 250 кВт

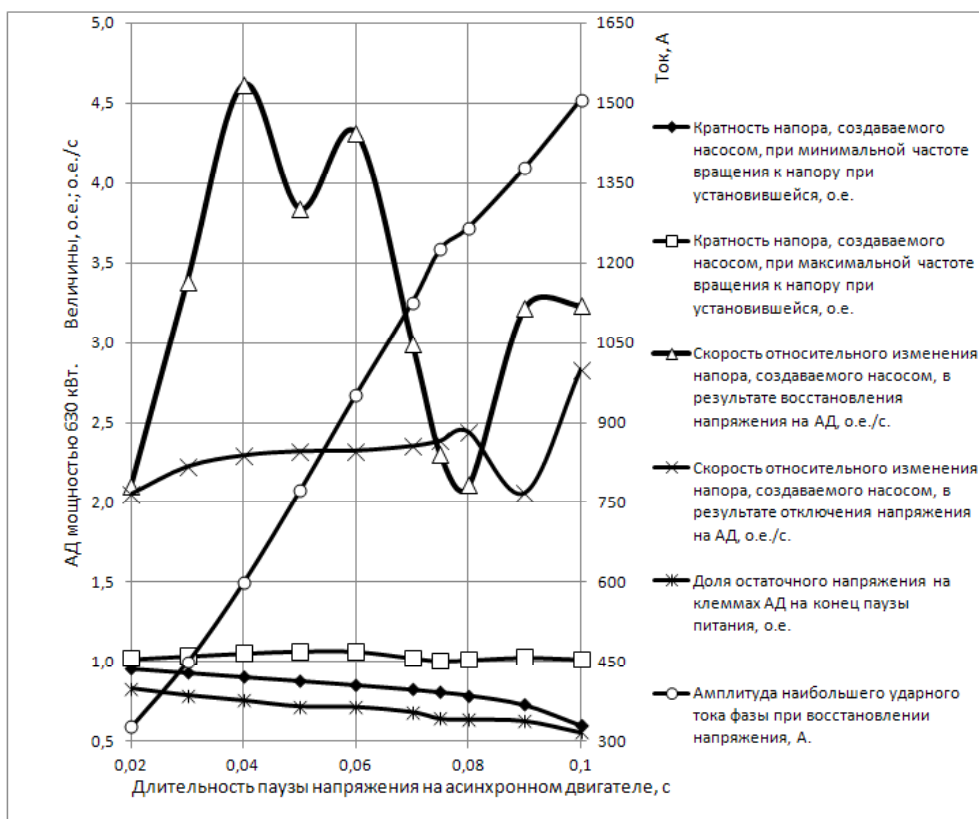


Рис. 4. Зависимости, полученные при моделировании АВР АД мощностью 630 кВт

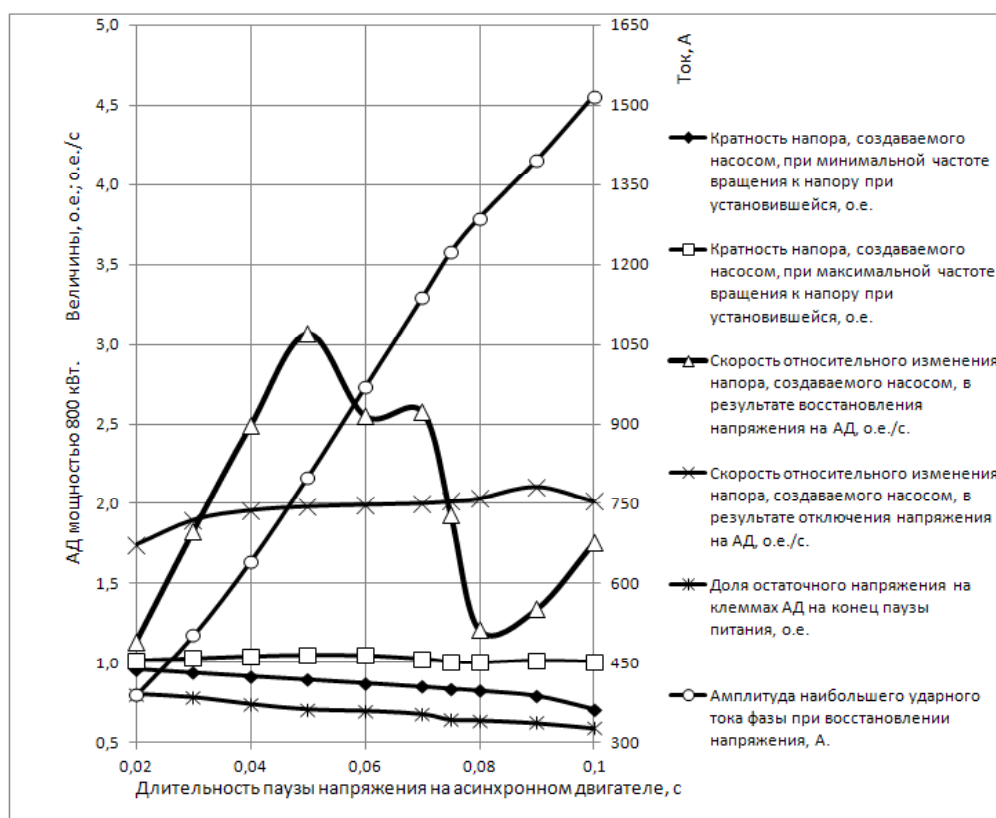


Рис. 5. Зависимости, полученные при моделировании АВР АД мощностью 800 кВт

Заключение. Проведённое компьютерное моделирование выявило наличие сложной нелинейной зависимости скорости относительного изменения напора, создаваемого насосом в результате восстановления напряжения на АД, от длительности паузы питающего напряжения, что может оказывать влияние на возможность возникновения и силу гидроудара. Таким образом, не представляется возможным утверждать, что увеличение быстродействия БАВР однозначно приводит к снижению риска возникновения и возможных последствий гидравлического удара.

Более точные выводы по этому вопросу могут быть сделаны в каждом конкретном случае при учёте характеристик реальной системы: кинематической схемы привода, свойств трубопроводов, жидкости.

Пуск АД привода насоса из неподвижного состояния не обязательно характеризуется более тяжёлым переходным процессом по сравнению с включением вращающегося АД.

Библиографический список

1. Короткевич, М. А. Основы эксплуатации электрических сетей: учеб. пособие / М. А. Короткевич. — Минск: Вышэйш. школа — 1999. — 267 с.
2. Янукович, А. БАВР: быстродействующий автоматический ввод резерва / А. Янукович // Электротехнический рынок. — № 9 (15), 2007. Электрон. ресурс. Режим доступа: <http://market.elec.ru/nomer/13/bavr/> (дата обращения: 08.01.2012).
3. Аптекарь, Д. Методы и средства повышения надёжности электроснабжения ответственных потребителей / Д. Аптекарь, Г. Рубашев, Д. Чиканков // Новости электротехники. — № 2 (8), 2001. Электрон. ресурс. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2001/8/> (дата обращения: 08.01.2012).
4. Москаленко, В. В. Системы автоматизированного управления электропривода: учебник / В. В. Москаленко — Москва: ИНФРА-М, 2007. — 208 с.

5. Устройства повышения надёжности электроснабжения ответственных потребителей // Сайт Института энергетической электроники отдела электроэнергетических проблем РАН. Электрон. ресурс. Режим доступа: <http://www.ipe.ru/publicat/TAVR.html> (дата обращения: 08.01.2012).

6. Пустоветов, М. Ю. Модель асинхронного электропривода, выполненная в системе OrCAD 9.2 / М. Ю. Пустоветов, И. В. Пехотский, П. Г. Колпахчан, С. Ю. Пустоветова // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: межвуз. сб. науч. тр. / КГТУ, Красноярск, 2002. — С. 42—51.

7. Пустоветов, М. Ю. Приближённый расчёт параметров схемы замещения асинхронного двигателя / М. Ю. Пустоветов, С. Ю. Пустоветова // МГОУ — XXI — Новые технологии. — № 1. — 2004. — С. 25—28.

8. Пустоветов, М. Ю. Моделирование нагрузки на валу и расчёт КПД электрической машины в среде OrCAD 9.2 / М. Ю. Пустоветов, С. Ю. Пустоветова // Новая техника и технология в производстве сельскохозяйственных машин: сб. науч. тр. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. акад. с.-х. машиностроения, 2002. — С. 145—151.

9. Болотовский, Ю. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга / Ю. И. Болотовский, Г. И. Таназлы. — Москва: СОЛОН-Пресс, 2005. — 200 с.

10. Вильнер, Я. М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалёв, Б. Б. Некрасов. — Минск: Вышэйш. школа, 1976. — 416 с.

Материал поступил в редакцию 11.01.2012.

References

1. Korotkevich, M. A. Osnovy`e`kspluatacii e`lektricheskix setej: ucheb. posobie / M. A. Korotkevich. — Minsk: Vy`she`jsh. shkola — 1999. — 267 s. — In Russian.

2. Yanukovich, A. BAVR: by`strodejstvuyushhij avtomaticheskij vvod rezerva / A. Yanukovich // E`lektrotexnicheskij ry`nok. — № 9 (15), 2007. E`lektron. resurs. Rezhim dostupa: <http://market.elec.ru/nomer/13/bavr/> (data obrashheniya: 08.01.2012). — In Russian.

3. Aptekar`, D. Metody`i sredstva povы`sheniya nadyozhnosti e`lektrosnabzheniya otvetstvenny`x potrebitelej / D. Aptekar`, G. Rubashev, D. Chikankov // Novosti e`lektrotexniki. — № 2 (8), 2001. E`lektron. resurs. Rezhim dostupa: <http://www.news.elteh.ru/arh/2001/8/> (data obrashheniya: 08.01.2012). — In Russian.

4. Moskalenko, V. V. Sistemy`avtomatizirovannogo upravleniya e`lektroprivoda: uchebnik / V. V. Moskalenko — Moskva: INFRA-M, 2007. — 208 s. — In Russian.

5. Ustrojstva povы`sheniya nadyozhnosti e`lektrosnabzheniya otvetstvenny`x potrebitelej // Sajt Instituta e`nergeticheskoy e`lektroniki otдела e`lektroe`nergeticheskix problem RAN. E`lektron. resurs. Rezhim dostupa: <http://www.ipe.ru/publicat/TAVR.html> (data obrashheniya: 08.01.2012). — In Russian.

6. Pustovetov, M. Yu. Model`asinxronnogo e`lektroprivoda, vy`polnennaya v sisteme OrCAD 9.2 / M. Yu. Pustovetov, I. V. Pexotskij, P. G. Kolpach`yan, S. Yu. Pustovetova // Optimizaciya rezhimov raboty`sistem e`lektroprivodov: mezhvuz. sb. nauch. tr. / KGTU, Krasnoyarsk, 2002. — S. 42—51. — In Russian.

7. Pustovetov, M. Yu. Priblizhyonny`j raschyot parametrov sxemy`zameshheniya asinxronnogo dvigatelya / M. Yu. Pustovetov, S. Yu. Pustovetova // MGOU — XXI — Novy`e tehnologii. — № 1. — 2004. — S. 25—28. — In Russian.

8. Pustovetov, M. Yu. Modelirovanie nagruzki na valu i raschyot KPD e`lektricheskoy mashiny`v srede OrCAD 9.2 / M. Yu. Pustovetov, S. Yu. Pustovetova // Novaya texnika i texnologiya v proizvodstve

sel'skoxozyajstvenny`x mashin: sb. nauch. tr. — Rostov-na-Donu: Rost. gos. akad. s.-x. mashinostroeniya, 2002. — S. 145—151. — In Russian.

9. Bolotovskij, Yu. I. OrCAD. Modelirovanie. «Povarennaya» kniga / Yu. I. Bolotovskij, G. I. Tanazly`. — Moskva: SOLON-Press, 2005. — 200 s. — In Russian.

10. Vil`ner, Ya. M. Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam / Ya. M. Vil`ner, Ya. T. Kovalyov, B. B. Nekrasov. — Minsk: Vy`she`jsh. shkola, 1976. — 416 s. — In Russian.

FAST AUTOMATIC TRANSFER SCHEME FOR HIGH VOLTAGE INDUCTION MOTORS AND WATER HAMMER

M. Y. Pustovetov

(Don State Technical University)

Some computer simulation issues on the automatic transfer for the water pump powerful high voltage induction motors are considered. The occurrence of more and less beneficial supply voltage spacing intervals for the water hammer characteristics is revealed.

Keywords: *fast automatic transfer scheme, induction motor, ultra high voltage SCR thyristor, pressure, water hammer.*