**Анализ систем управления вентильно-индукторным электродвигателем**

Загурская Ирина Вячеславовна

Зелинский Валерий Евгеньевич

Капустин Владимир Николаевич

Институт сферы обслуживания и предпринимательства

(филиал) ДГТУ в г. Шахты

**Аннотация:** В статье рассмотрены и проанализированы системы управления вентильно-индукторными электродвигателями; показана целесообразность применения систем управления без датчика положения на роторе.

Двигатели с переключаемым магнитным сопротивлением (вентильно-индукторный двигатель, ВИД) обладают такими достоинствами, как простая конструкция с отсутствием обмоток со стороны ротора, отказоустойчивость из-за характеристик, имеющих высокие допуски, надежность, низкую стоимость из-за отсутствия постоянных магнитов в конструкции и возможную работу в условиях высокой температуры или при интенсивных изменениях температуры. Крутящий момент в вентильно-индукторном двигателе возникает из стремления полюсов ротора согласоваться с возбужденными полюсами статора. Принцип действия основан на различии в магнитном сопротивлении для линий магнитного поля между выровненным и не выровненным положением ротора при возбуждении катушки статора. При этом на ротор действует сила, которая выталкивает ротор в выровненное положение. Однако, поскольку конструкция вентильно-индукторного привода с дважды выступающими полюсами обладает нелинейными магнитными характеристиками, недостатки ВИД в виде акустического шума и пульсации крутящего момента более серьезны, чем у других типов двигателей. Пульсация крутящего момента является неотъемлемым недостатком коммутируемых электродвигателей с магнитным сопротивлением. Коммутация фазного тока является основной причиной пульсации крутящего момента.

На рисунке 1.1 показан 8/6 вентильно-индукторный привод с однофазным асимметричным инвертором. Этот 4-фазный вентильно-индукторный привод имеет 8 полюсов статора и 6 полюсов ротора, каждая фаза состоит из двух катушек, состоящих из нескольких электрически разделенных контуров или фаз, намотанных на противоположных полюсах и соединенных последовательно или параллельно. Эти фазовые обмотки могут возбуждаться раздельно или вместе в зависимости от схемы управления или преобразователя. Из-за простой конструкции двигателя вентильно-индукторный привод требует простого преобразователя и достаточно простой системы управления.

**

Рисунок 1 - Вентильно-индукторный привод с однофазным асимметричным инвертором

Выровненное положение фазы определяется как ситуация, когда полюсы статора и ротора фазы полностью выровнены друг с другом (), достигая минимального положения сопротивления и в этом положении. Индуктивность фазы максимальна (). Индуктивность фазы постепенно уменьшается, когда полюса ротора отходят от выровненного положения в любом направлении. Когда полюса ротора симметрично смещены с полюсами статора фазы (), положение считается не выровненным, и в этом положении фаза имеет минимальную индуктивность (). Хотя концепция индуктивности неприменима для сильно насыщенной машины, такой как ВИД, ненасыщенные выровненные и не выровненные инкрементные индуктивности являются двумя ключевыми опорными позициями для отслеживания.

Вентильно-индукторный привод управляется входным напряжением, включением и выключением. Угол включения и выключения регулирует величину и форму текущей формы сигнала. Также это приводит к влиянию величины и формы развиваемого крутящего момента. Для эффективного создания тока с помощью источника напряжения требуется предварительное переключение перед встречей полюсов. Угол включения является одним из основных факторов для контроля нарастающих токов. Поэтому этот угол управляется точно для получения оптимальных характеристик движения.

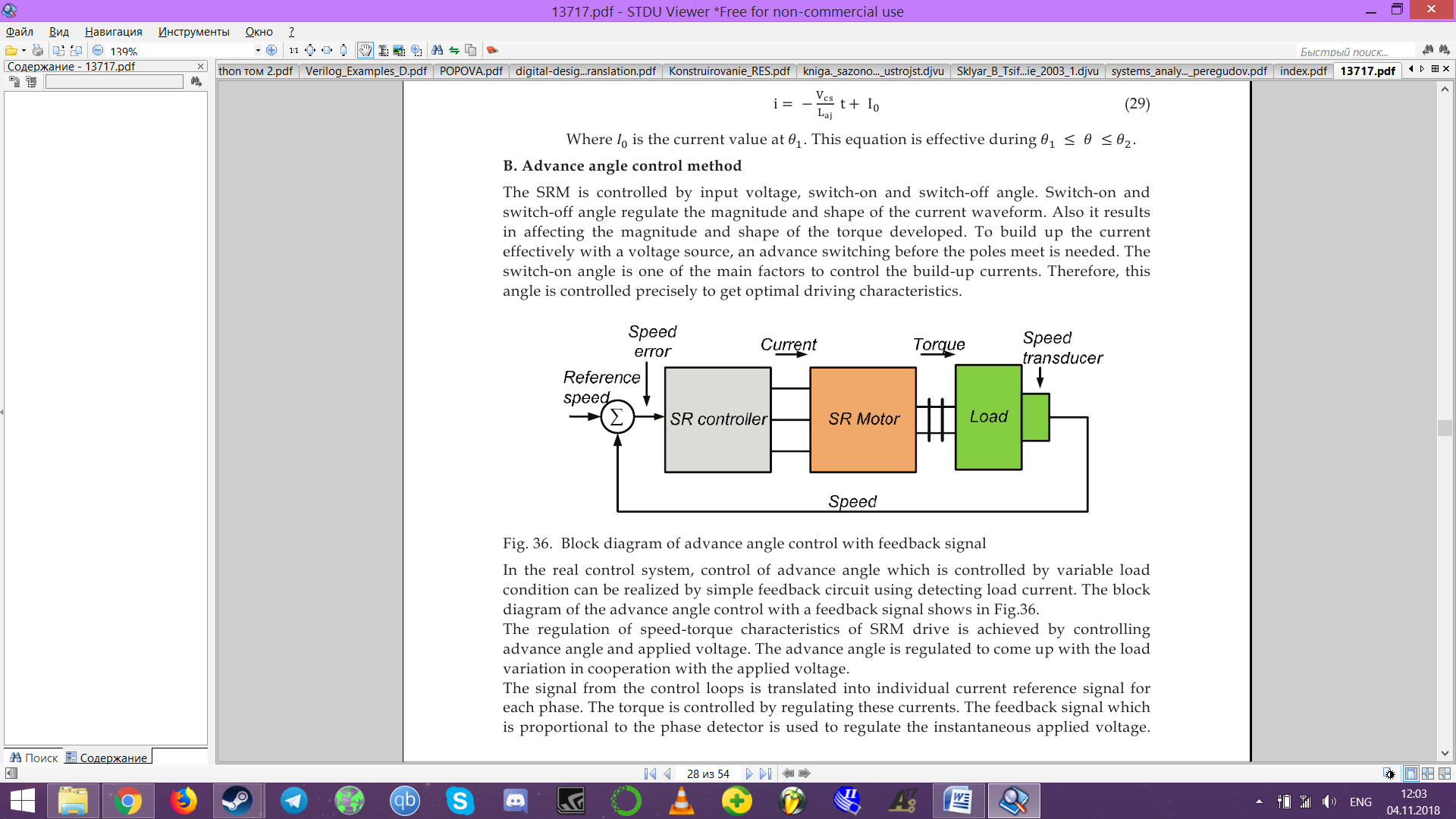


Рисунок 2- Блок-схема управления углом вперед с сигналом обратной связи

В реальной системе управления управление углом вперед, которое контролируется условием переменной нагрузки, может быть реализовано простой схемой обратной связи с использованием определения тока нагрузки. Структурная схема управления углом вперед с сигналом обратной связи показана на рисунке 2.

Регулирование характеристик крутящего момента для привода ВИД достигается путем управления углом вперед и приложенным напряжением. Угол продвижения регулируется так, чтобы возникать изменение нагрузки в сочетании с приложенным напряжением.

Сигнал от контуров управления преобразуется в отдельный опорный сигнал тока для каждой фазы. Крутящий момент регулируется изменением этих токов. Сигнал обратной связи, который пропорционален фазовому детектору, используется для регулирования мгновенного приложенного напряжения.

Изменение соотношения момента с током или крутящим моментом с положением ротора должно быть скомпенсировано в алгоритме управления подачей вперед вперед. Связь между моментами и током фазы показана на рисунке 3.

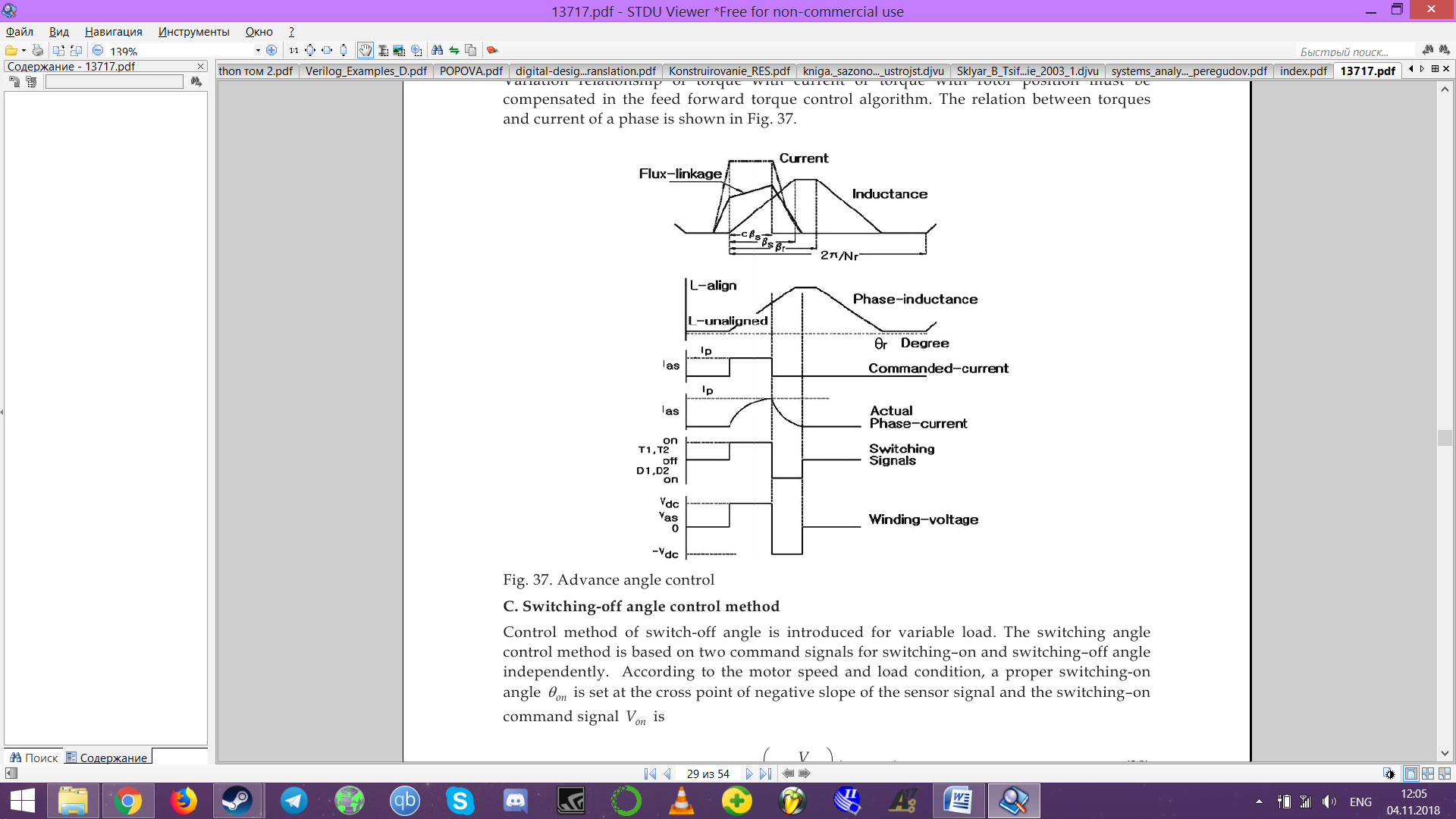


Рисунок 3 - Регулирование угла наклона вперед

Метод управления углом выключения. Для переменной нагрузки вводится метод управления углом выключения. Метод управления углом переключения основан на двух командных сигналах для независимого включения и выключения. В соответствии с уравнениями скорости и нагрузки двигателя в точке пересечения отрицательного наклона сигнала датчика устанавливается правильный сигнал включения *Uon*.

 (1)

Максимальный угол включения находится в минимальной области индуктивности. Таким образом, быстрое нарастание тока возможно при номинальной нагрузке. Минимальный угол включения находится в области увеличения индуктивности. Поэтому плавное нарастание тока возможно при легкой нагрузке с плавным крутящим моментом. Аналогичным образом, сдвиг угла наклона задается в точке пересечения положительного наклона сигнала и выключения командного сигнала *Uoff* как:

 (2)

Кроме того, угол выдержки представляет собой интервал углов включения и выключения, который принимает форму:

 (3)

Существует два типа угла выключения управления, один - управление постоянным крутящим моментом (), а другой - постоянный контроль угла выдержки ().

Постоянный контроль угла крутящего момента. Угол крутящего момента - это угол между увеличением индуктивности и углом выключения. Этот метод управления фиксирует угол выключения, а угол поворота настраивается для изменения скорости и нагрузки с помощью метода управления постоянным крутящим моментом. Флуктуация эффективности мала до номинальной мощности, но, если угол поворота движется в сторону увеличения крутящего момента, даже в области уменьшения индуктивности ток будет течь и будет производиться отрицательный крутящий момент. Таким образом, эффективность уменьшается. Поэтому необходимо найти правильное положение угла поворота и фазного тока, который определяется методом управления постоянным крутящим моментом.

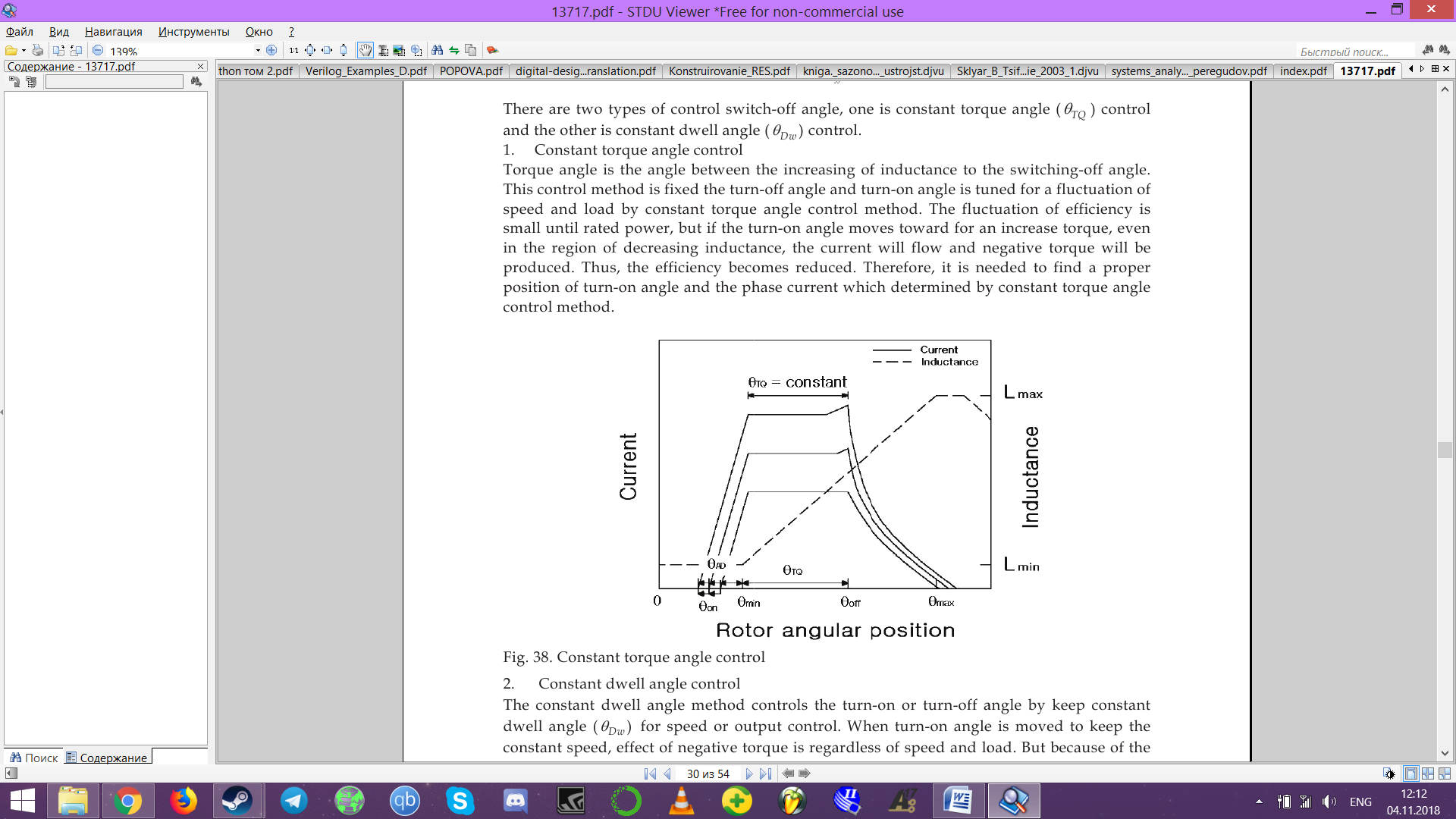


Рисунок 4 - Постоянный контроль угла крутящего момента

Метод постоянного постоянного угла контролирует угол включения или выключения, поддерживая постоянный угол удержания () для управления скоростью или выходом. Когда угол поворота перемещается для поддержания постоянной скорости, эффект отрицательного крутящего момента зависит от скорости и нагрузки. Но из-за пределов номинальной мощности он может быть нестабильным при перегрузке. Этот метод делает систему управления простой и легкой, чтобы избежать отрицательного крутящего момента в области отключения. На рисунке 5 показана зависимость между током и положением ротора при постоянном управлении ().

Производство крутящего момента в вентильно-индукторный привод не является постоянным, и оно должно устанавливаться с нуля при каждом ударе. Каждая фаза должна быть под напряжением под углом поворота и выключена с углом выключения. В диапазоне низких скоростей крутящий момент ограничивается только током, который регулируется либо напряжением-PWM, либо мгновенным током. По мере увеличения скорости также увеличивается обратная ЭДС, и для регулирования тока имеется недостаточное напряжение; крутящий момент можно контролировать только по времени импульса тока. Этот режим управления называется одноимпульсным режимом.

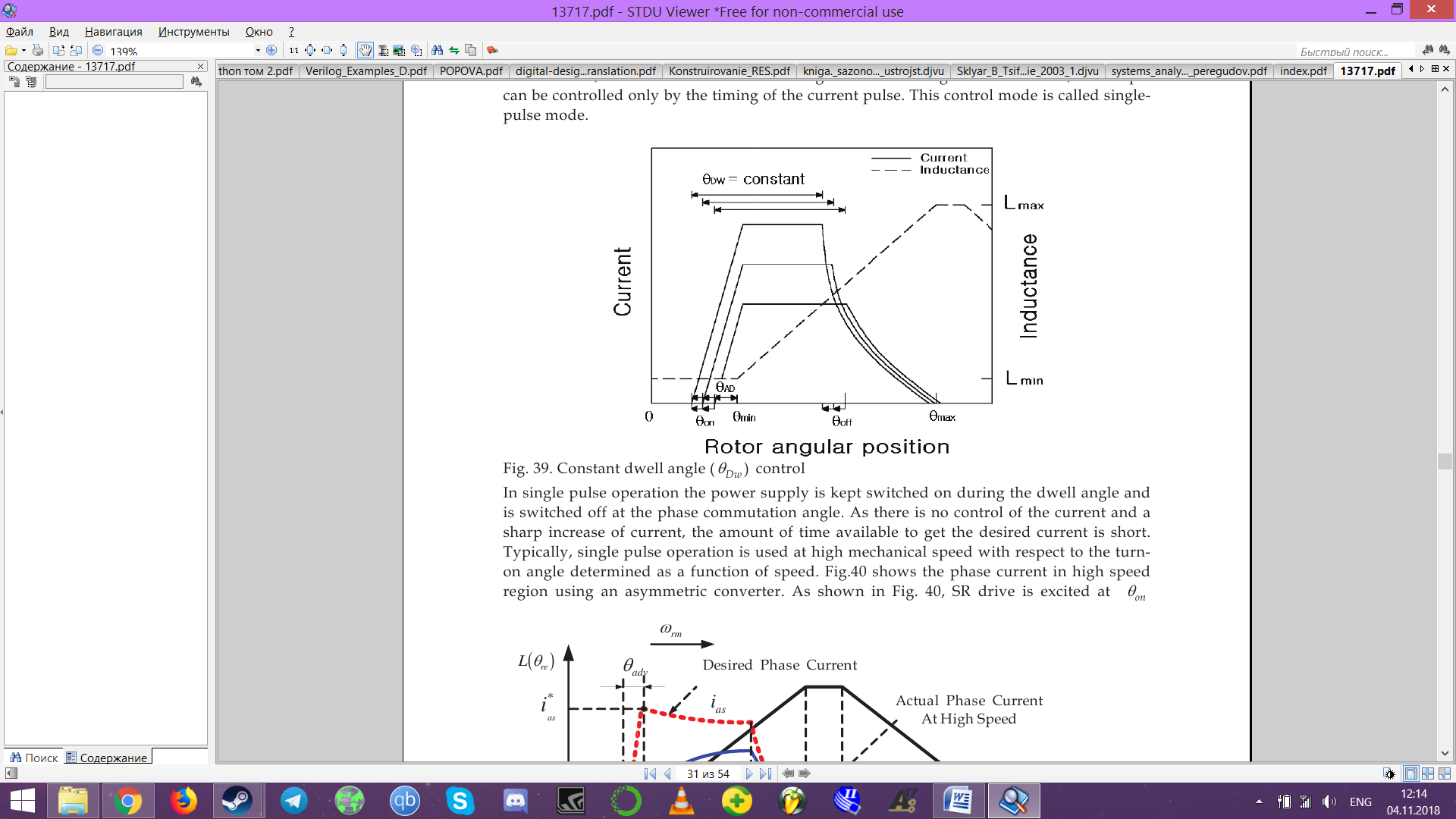


Рисунок 5 - Контроль постоянного угла ()

При работе с одним импульсом источник питания остается включенным во время угла задержки и выключается с углом фазовой коммутации. Поскольку контроль тока отсутствует и резкое увеличение тока, время, необходимое для получения нужного тока, невелико. Как правило, операция с одним импульсом используется с высокой механической скоростью относительно угла поворота, определяемого как функция скорости. На рисунке 6 показан фазовый ток в высокоскоростной области с использованием асимметричного преобразователя. Как показано на рисунке 6, привод ВИД возбуждается при положение вперед, как , чем начальная точка области положительного крутящего момента , чтобы установить достаточный ток крутящего момента. Желаемый фазовый ток, показанный штрих-линией на рисунке 6, размагничивается при и уменьшается до нуля до начальной точки области отрицательного крутящего момента , чтобы избежать отрицательного крутящего момента.

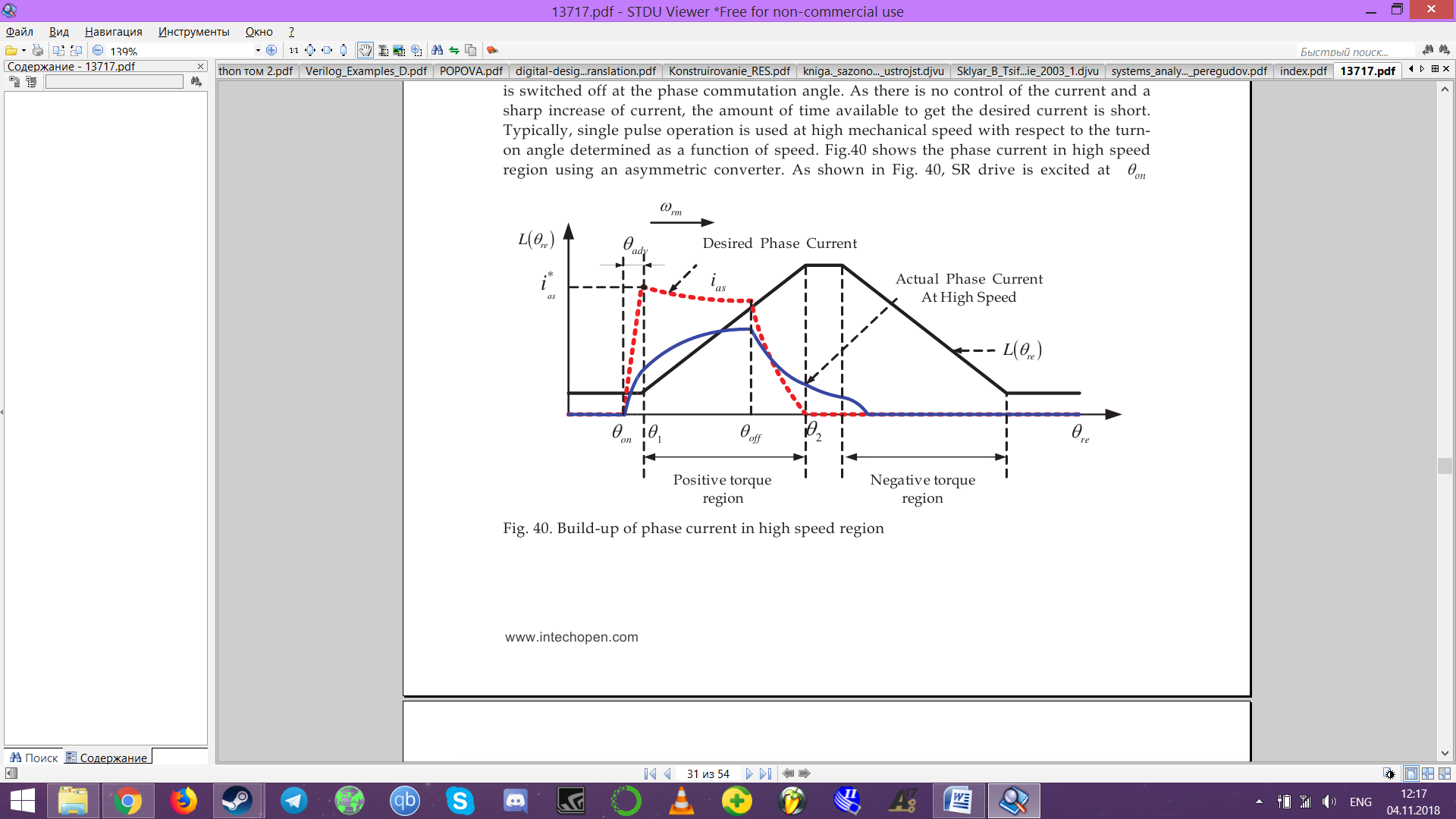


Рисунок 6 - Создание фазового тока в высокоскоростной области

Чтобы обеспечить достаточное время для наращивания тока фазы желания , угол наклона можно отрегулировать в соответствии со скоростью двигателя . Из уравнений напряжения вентильно-индукторный привод правильный угол продвижения может быть рассчитан по времени нарастания тока следующим образом, независимо от фазового сопротивления в положении включения.

 (4)

где обозначает желаемый фазовый ток регулятора тока, а - напряжение на клеммах каждой фазной обмотки. Угол продвижения определяется скоростью двигателя и (4), как:

 (5)

Как увеличение скорости, угол продвижения должен быть больше, и положение включения может быть увеличено, чтобы не развивать отрицательный крутящий момент. Следовательно, вентильно-индукторный привод не может обеспечить достаточный выходной крутящий момент. В области с высокой скоростью положение поворота и выключения фиксировано и скорость движения изменяется. Чтобы преодолеть эту проблему, требуется высокое напряжение клеммы возбуждения во время включения от до .

Схема управления динамическим углом похожа на управление угловым моментом в синхронной машине. Когда вентильно-индукторный привод управляется в стационарном состоянии, производятся следы, такие как показано на рисунке 7 (а). Ток отключения фиксируется в заданном положении ротора. Это может быть легко сделано с помощью датчика, установленного на валу. Если нагрузка снижается, двигатель ускоряется почти мгновенно. Этим ускорением продвигается импульсный сигнал от энкодера ротора. Этот эффект уменьшит интервал отключения до момента крутящего момента нагрузки и разработанных балансов крутящего момента [2]. На рисунке 7 (б) показано это действие. Напротив, если нагрузка увеличивается, ротор будет замедляться, и момент отключения будет отложен. Эффект приводит к увеличению развитого крутящего момента. На рисунке 7 (с) показан процесс регулирования угла выдержки в этот момент.

Принцип динамического угла выдержки аналогичен принципу PLL. Функция PLL в этом элементе управления состоит в том, чтобы отрегулировать угол задержки для точного управления скоростью. Фазовый детектор в петле PLL обнаруживает изменение нагрузки и регулирует угол задержки, сравнивая опорный сигнал (вход) с сигналом обратной связи (выход) и фиксируя его разность фаз постоянным. На рисунке 8 показана блок-схема PLL в приводе SR. Он имеет фазовый компаратор, фильтр контура и привод вентильно-индукторный привод.

Опорный сигнал является командой скорости и используется для включения сигнала. Выходной сигнал фазового детектора используется для управления напряжением через петлевой фильтр. Коммутационный преобразователь регулирует углы переключения. Выходной сигнал фазового детектора осуществляется путем разности фаз между опорным сигналом и сигналом датчика ротора. На него влияют изменения нагрузки. Угол задержки аналогичен разности фаз в фазовом детекторе. Чтобы применить динамический контроль угла в системе СИ привода, опорная частота сигналы используются для включения, и сигнал датчика ротора используются для выключения аналогична функции фазового детектора. Угол выключения фиксируется положением энкодера ротора. Следовательно, сигнал энкодера ротора задерживается с увеличением крутящего момента нагрузки. Этот результат представляет собой увеличение угла наклона и начального фазного тока.

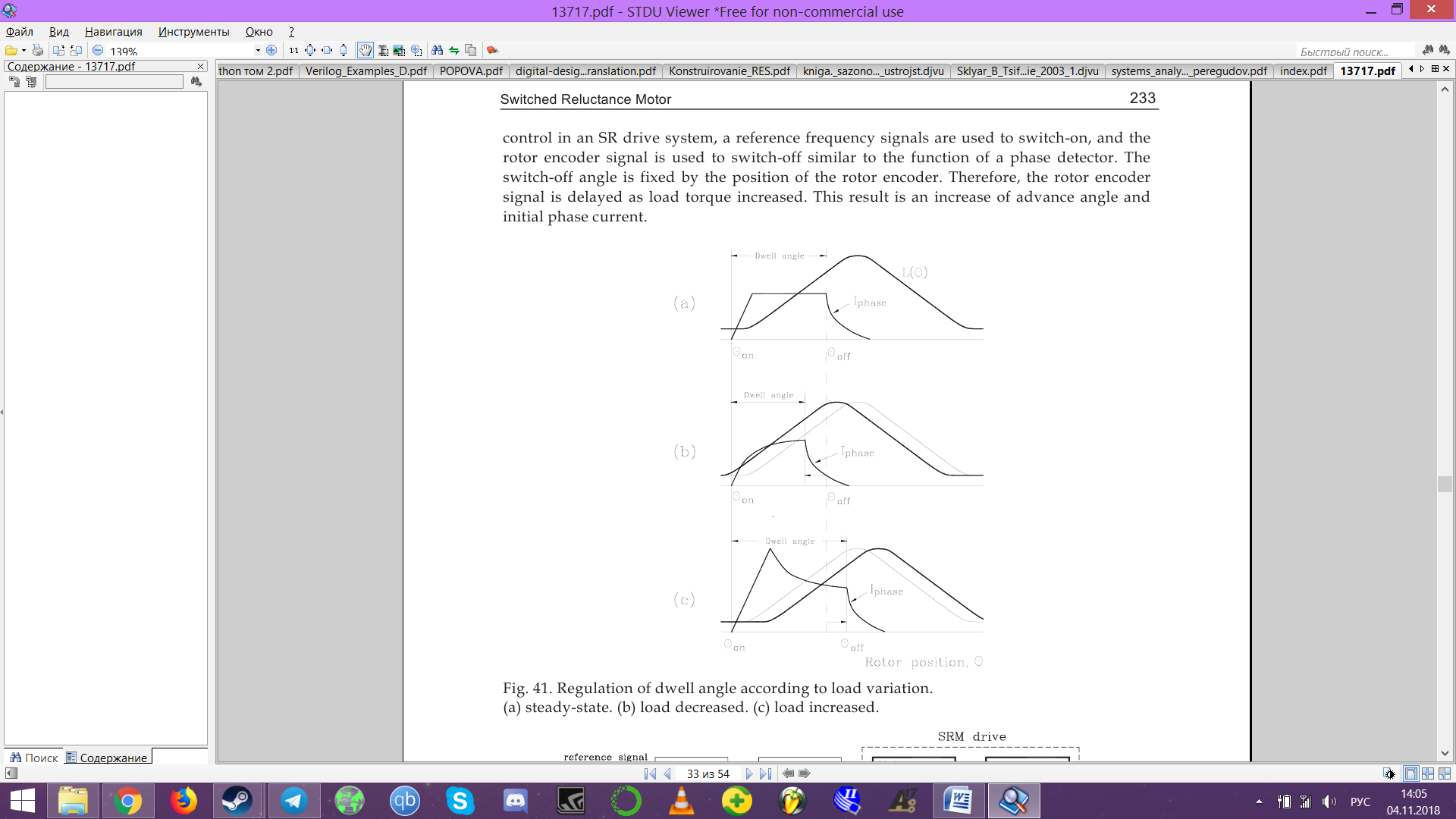


Рисунок 7- Регулирование угла выдержки в зависимости от изменения нагрузки. (а) стационарного состояния. (б) снижение нагрузки. (c) увеличение нагрузки.

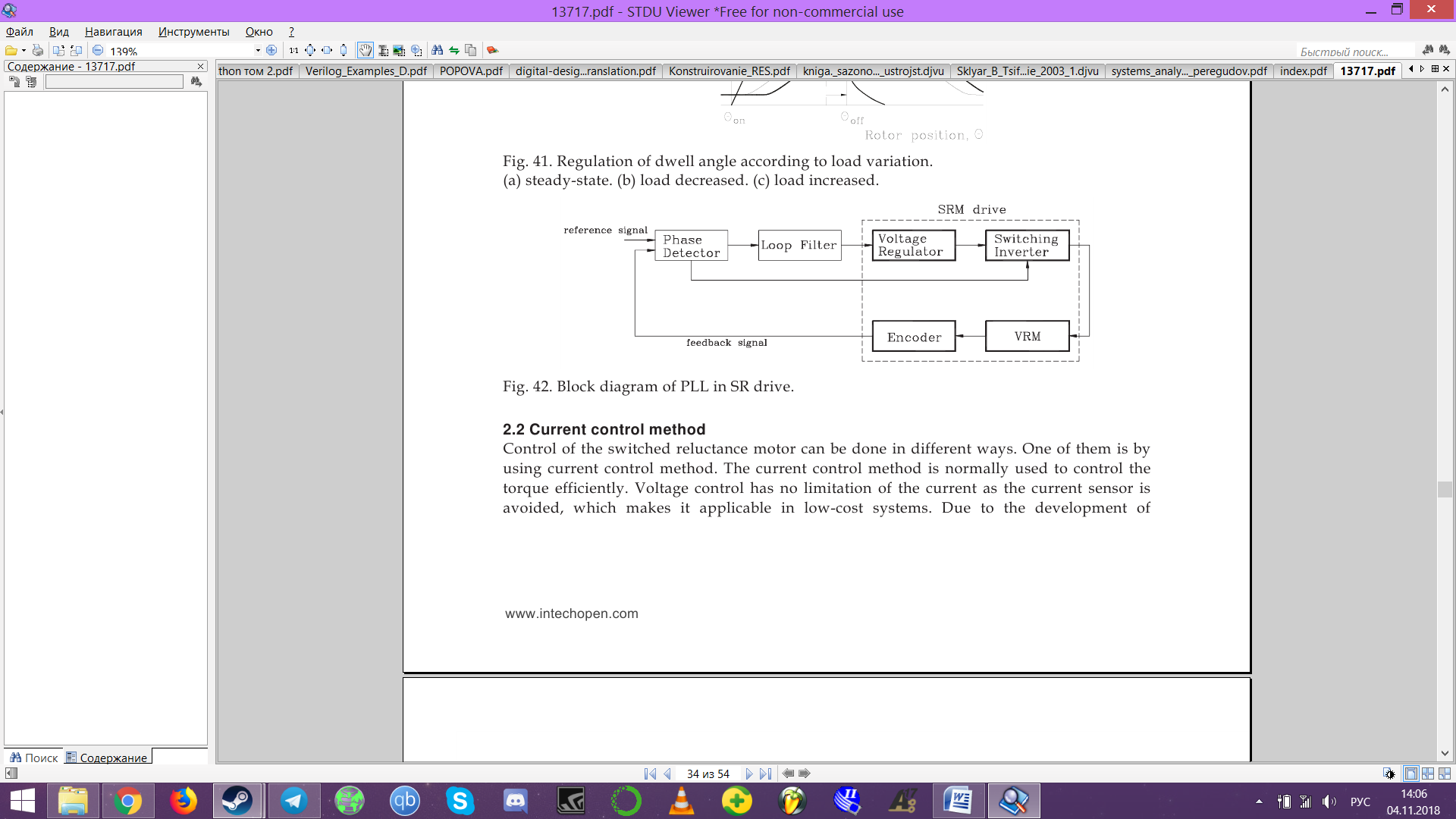


Рисунок 8 - Блок-схема PLL в приводе ВИД

Управление двигателем с переключаемым сопротивлением может быть выполнено по-разному. Один из них - с использованием текущего метода управления. Текущий метод управления обычно используется для эффективного управления крутящим моментом. Управление напряжением не ограничивает ток, так как отсутствует датчик тока, что делает его применимым в недорогих системах. Благодаря разработке микроконтроллеров различные контуры управления изменились с аналоговых на цифровые, что позволяет использовать более сложные функции управления.

1. Ахунов Т.А., Макаров Л.Н., Бычков М.Г., Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод – перспективы применения. Приводная техника. 2001. № 2. С. 14–17.
2. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. 1997. № 8. С. 35-44
3. Ключев В.И. Теория электропривода. Энергоатомиздат, 1998. 704 с.