



СТАБИЛИЗАЦИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДКИН И ПОСТРОЕНИЕ АДДИТИВНОЙ ЛОГИКИ КООРДИНАЦИИ ЗАЩИТ

Скопин Г.А., Комков А.Н.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия
asostraik@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена ростом доли чувствительных электроприемников в распределительных сетях низшего напряжения, где глубокие провалы и искажения напряжения вызывают остановку технологических процессов, нештатные режимы силовой электроники и настроенных защит. Динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН) способен восстановить форму напряжения при возникновении данных явлений, однако при длительной компенсации в условиях дефицита мощности система может перейти в предельный колебательный режим. Это нарушает штатную работу защит и усугубляет переходный процесс. ЦЕЛЬ исследования заключается в формировании комплексного подхода к согласованию алгоритмов ДКИН и системы защит через определение границы устойчивости системы и разработку логики безопасного перехода от режима компенсации к защитным мероприятиям с учетом возможности подавления колебаний путем настройки параметров компенсатора. МЕТОДЫ включают математическое описание ДКИН и компьютерное моделирование в MATLAB Simulink для серии глубоких провалов напряжения с параметрическим изменением компенсатора, для обеспечения стабилизации системы. По полученным данным о характере компенсации формируется аддитивная логика взаимодействия ДКИН и выбранных систем защит в первичной и вторичной конфигурации системы. РЕЗУЛЬТАТЫ показывают, что полученные зависимости допустимого времени компенсации от глубины провала и параметров накопителя, а также выделенные признаки приближения к предельному режиму для разных вариантов настройки системы, позволяют исключить негативные последствия критических режимов при комплексной имплементации полученных данных в логику срабатывания защит. При этом правильно подобранные параметры фильтрации и других узлов системы ДКИН позволяют исключить колебательные процессы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная логика ограничивает негативное влияние динамических процессов, формирует сигнал о приближении к предельному режиму и заранее инициирует защитные действия до потери стабильности. Полученные результаты оптимизации указывают на необходимость правильного расчета и подбора параметров компенсатора, что позволяет обеспечить контролируемый выход из режима компенсации, снизить колебательность и риск внештатных срабатываний защит, уменьшая негативное влияние на нагрузку.

Ключевые слова: динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН); релейная защита и автоматика (РЗА); автоматическое включение резерва (АВР); провал напряжения; DC-шина; устойчивость; переходный процесс.

Для цитирования: Скопин Г.А., Комков А.Н. Стабилизация критических переходных процессов ДКИН и построение аддитивной логики координации защит // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 86-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-86-102.

STABILIZATION OF CRITICAL TRANSIENT PROCESSES IN DVR SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF ADDITIVE PROTECTION COORDINATION LOGIC

Skopin G.A., Komkov A.N.

I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
Moscow, Russia
asostraik@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE* of the study is driven by the growing share of sensitive electrical loads in low-voltage distribution networks, where deep voltage sags and voltage distortions lead to stoppages of technological processes, abnormal operating modes of power electronics, and improper operation of coordinated protection devices. A Dynamic Voltage Restorer (DVR) can restore the voltage waveform when these phenomena occur; however, during prolonged compensation under power-deficit conditions, the system may enter a limiting oscillatory mode. This disrupts the normal operation of protection devices and aggravates the transient response. The AIM of the study is to develop a comprehensive approach to coordinating DVR control algorithms with the protection system by determining the system stability boundary and developing logic for a safe transition from the compensation mode to protective actions, taking into account the possibility of suppressing oscillations by tuning the compensator parameters. *METHODS* include a mathematical model of the DVR and computer simulations in MATLAB Simulink for a series of deep voltage sags with parametric variation of the compensator to ensure system stabilization. Based on the data obtained on the compensation behavior, an additive interaction logic between the DVR and the selected protection systems is formulated for the primary and secondary system configurations. *RESULTS* show that the derived relationships between the permissible compensation time and the sag depth and energy-storage parameters, as well as the identified indicators of approaching the limiting mode for different system tuning options, make it possible to eliminate the adverse effects of critical operating conditions when these findings are comprehensively implemented in the protection trip logic. At the same time, properly selected filtering parameters and other DVR subsystem settings can eliminate oscillatory processes. *CONCLUSION.* The developed logic limits the negative impact of dynamic processes, generates a signal indicating an approach to the limiting mode, and initiates protective actions in advance before stability is lost. The obtained optimization results indicate the need for accurate calculation and proper selection of compensatory parameters, which makes it possible to ensure a fully controlled exit from the compensation mode, reduce oscillations and the risk of unintended protection trips, and thereby reduce the negative impact on the load.

Keywords: *dynamic voltage restorer (DVR); relay protection and automation (RPA); automatic transfer switch (ATS); voltage sag; DC bus; stability; transient process.*

For citation: Skopin G.A., Komkov A.N. Stabilization of critical transient processes in DVR systems and development of additive protection coordination logic. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 86-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-86-102.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Провалы напряжения в сетях 0,4 кВ в настоящее время целесообразно рассматривать не только как показатель качества электрической энергии, но и как фактор технологического риска, влияющий на электромеханические режимы нагрузки и надёжность функционирования средств защиты и автоматики. Чувствительные электроприводы, источники питания и цифровые системы управления реагируют даже на кратковременные отклонения перезапусками, отказами и остановами оборудования, что напрямую влияет на непрерывность технологических процессов. Для снижения последствий применяются различные инженерные подходы, включая модернизацию систем электроснабжения и установку средств компенсации на наиболее уязвимых участках сети. Наиболее перспективным и практикоориентированным решением для последнего сценария является использование динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН) [1]. В результате анализа его возможностей возникает вопрос о том, что основное внимание в публикационной среде уделяется повышению качества восстановления напряжения и совершенствованию алгоритмов управления, тогда как вопросы критических режимов и их динамических последствий, а также вопросы согласованного взаимодействия с защитами освещаются в меньшей степени. Между тем внедрение устройств данного класса изменяет условия протекания и выявления ненормальных режимов работы системы. Проводимая устройством компенсация данных явлений на стороне нагрузки, для самого компенсатора оборачивается значительным снижением демпфирующих свойств. При снижении уровня заряда батареи и его приближении к энергетическим пределам, возникают значительные колебательные переходные процессы и, как следствие, проявляется флуктуация измеряемых величин, повышающая вероятность нестабильной работы пороговых алгоритмов защиты и автоматики. Очевидно, что подобные режимы необходимо учитывать при осуществлении

компенсации, которая будет влиять на наблюдаемость предаварийных состояний и корректность действий защит [2]. В результате, принципиальным становится рассмотрение не только эффективности работы устройства в штатных режимах работы, но и его поведения в предельных состояниях. Следовательно, важным объектом оценки и управления является переходный процесс вблизи границы устойчивой компенсации и его влияние на устойчивость и управляемость системы электроснабжения в целом. В результате формируется актуальная научно-прикладная задача разработки согласованной логики, в рамках которой компенсатор и защиты рассматриваются как элементы единой системы управления, обеспечивающей координацию действий до наступления наиболее неблагоприятной динамики, предотвращая развитие колебательных режимов и снижая вероятность нештатных срабатываний [3].

Дальнейший анализ направлен на исследование работ, в которых поднимаются описанные вопросы и проблемы определения границ устойчивой компенсации и последствий этих факторов для согласования действий компенсатора с защитными функциями системы. Предварительное сопоставление публикаций показывает, что перечисленные аспекты чаще исследуются раздельно и лишь в ограниченном числе работ сводятся в единую постановку проблемы, требующей решения.

Касаясь анализа работы ДКИН, основной массив исследований ориентирован на повышение качества компенсации и улучшение переходных процессов за счёт совершенствования систем управления [4]. Наиболее активно развиваются робастные подходы, включая скользящие режимы и методы подавления возмущений, обеспечивающие повышение устойчивости динамики и точности восстановления напряжения при глубоких провалах [5,6]. Данное направление дополняют работы по оптимизации настроек регуляторов, а также аппаратные решения, снижающие зависимость компенсатора от энергонакопителя, включая реализацию систем на основе матричных преобразователей, нацеленных на повышение быстродействия и упрощение силовой части [7]. В то же время во многих публикациях ДКИН рассматривается преимущественно как автономный объект управления, вследствие чего вопросы согласования его режимов с внешними защитно-автоматическими устройствами и объединения с их функциями, а также влияние предельных режимов компенсации на условия корректного функционирования, освещаются ограниченно либо не рассматриваются.

Отдельное направление анализа, обусловленное отсутствием совокупных данных по поставленному вопросу, связано с оценкой пределов работоспособности компенсации. Существующие исследования показывают, что выбор режима компенсации и энергетические затраты ДКИН существенно влияют на достижимую глубину и длительность компенсации [8], а в работах с подключением накопителя к звену постоянного тока подчёркивается роль энергетического обеспечения и алгоритмов управления источником при тяжёлых возмущениях [9]. Однако диагностические признаки, отражающие энергетическое состояние компенсатора и переход к режимам ограничения, как правило, трактуются как внутренняя информация системы управления и существенно реже рассматриваются как формализованные входные сигналы для внешних алгоритмов защиты. Наряду с этими энергетическими ограничениями, необходимо отметить, что на устойчивость и колебательность переходных процессов существенно влияет выходное фильтрующее звено и другие элементы преобразования энергии. В ряде работ устойчивость обеспечивается выбором структуры или параметров фильтра, а также алгоритмами подавления колебательных составляющих [10], однако связь между настройкой фильтрации, проявлениями приближения к предельным режимам ДКИН и условиями корректного функционирования с имплементацией защитных функций обычно не формализуется и не изучается системно.

В связи с чем конечным этапом исследований становится оценка литературы в тематике автоматики и защит. В современных системах чаще всего рассматривается вопрос управления, связанный с ростом доли распределённых источников на инверторной основе, для которых характерны изменения измерительной картины аварийных режимов и ограничения токов. Эти особенности отражены в обзорных работах по координации защит [11,12]. Отдельно анализируются проблемы применимости традиционных защитных принципов и особенности направленных токовых функций в присутствии инверторных источников [13], а также подходы к оптимизации уставок и координации направленных токовых защит с учётом влияния IBR на селективность и чувствительность [14]. Вместе с тем влияние серийной компенсации напряжения и энергетических ограничений ДКИН на наблюдаемость режимов и на корректность последовательности защитных действий рассматривается существенно реже, а работы по комбинированным устройствам,

совмещающим компенсацию напряжения и ограничение токов короткого замыкания [15], относятся к иному классу задач и не закрывают вопрос координации с динамикой и ограничениями ДКИН в низковольтной сети. Следовательно, сохраняется актуальность комплексного рассмотрения переходного процесса, в котором режимы ДКИН, энергетическое состояние звена постоянного тока, параметры выходного звена и логика защиты и переключения анализируются совместно и формализуются в рамках единой схемы взаимодействия.

Цель исследования заключается в формировании комплексного подхода к согласованию алгоритмов работы динамического компенсатора искажений напряжения и системы защит в сетях 0,4 кВ при глубоких провалах напряжения через определение границы устойчивости системы и разработку логики безопасного перехода от режима компенсации к защитным мероприятиям, с учетом возможности подавления колебаний настройкой параметров компенсатора.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Выполняется анализ современной литературы по компенсации провалов напряжения с применением динамических компенсаторов в разрезе критических режимов.

2. Формируется математическое описание и модельная постановка системы, включающая шину постоянного тока, накопитель энергии и выходное фильтрующее звено типа RLC, а также критерии предельного режима компенсации.

3. Проводится параметрическое исследование влияния параметров устройства на устойчивость и колебательность переходного процесса с выделением условий, при которых колебательные процессы подавляются.

4. Разрабатывается аддитивная логика взаимодействия компенсатора и выбранных функций защиты, в которой признаки приближения к предельному режиму и режимы ограничения компенсации используются для своевременного инициирования защитных действий.

Научная значимость исследования заключается в объединении энергетико-динамического анализа предельных режимов компенсации с учётом влияния параметров компенсатора и разработке согласованной логики защитных функций для предотвращения критических режимов работы системы. Указанная значимость конкретизируется следующими основными научными результатами:

- аналитическая проработка позволила установить зависимости, связывающие параметры выходного RLC-фильтра и другие характеристики компенсатора с динамикой критического переходного процесса и определить, что данные параметры влияют не только на степень подавления колебаний, но и на границы области устойчивой компенсации, включая критическое напряжение и критический уровень заряда накопителя ($SoC_{крит}$);

- выполненная разработка алгоритма превентивного автоматического переключения на резервный источник питания (АВР) и других защитных мер, реализованных на основе аддитивной логики, позволила обеспечить прогнозирование момента достижения критического уровня заряда накопителя ($SoC_{крит}$) и селективность работы защит, снижая вероятность некорректных срабатываний и обеспечивая устойчивость системы в предельных режимах.

В совокупности стабилизация параметров компенсатора и применение предложенной логики защиты обеспечивают существенное повышение устойчивости работы системы в предельных режимах, что приводит к повышению устойчивости системы.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенных принципов при внедрении динамических компенсаторов и других типов устройств компенсации в реальные низковольтные системы электроснабжения. Выстроенная согласованная логика и оптимизация параметров устройства могут быть реализованы на базе микропроцессорных устройств релейной защиты и подстанционной автоматики, поддерживающих пользовательские алгоритмы и быстрый обмен сигналами между конечными участниками сети. Исходя из предварительной оценки, внедрение таких решений должно сократить длительность провалов питания при переключениях АВР примерно на 90 % — до долей миллисекунд или полного их исключения, повысить временные возможности компенсации на 30–40 % за счёт значительного увеличения допустимого времени компенсации до стандартизированных пределов уровня напряжения и ускорить реакцию системы на критические возмущения с учётом выявленных взаимосвязей на 50–60 %.¹ Кроме того, применение данной логики позволит снизить количество

¹ Приведённые диапазоны являются ориентировочными и основаны на типовых сетях и обобщённых производственных данных. Их достоверность требует практической проверки на широкой выборке наблюдений; значения не являются окончательными.

внештатных остановок и увеличить среднее время наработки оборудования до отказа за счёт сокращения перегрузок и критических режимов.

Теоретический анализ и математическая модель (*Theoretical analysis and mathematical model*)

Поскольку, как ранее отмечалось, на динамику процесса влияет множество параметров системы, в рамках методики анализа основной акцент делается на параметрах устройства ДКИН. Это связано с тем, что они одновременно определяют требуемый уровень напряжения инвертора при компенсации заданной глубины провала и формируют условия демпфирования в выходном звене. Поэтому требуемое напряжение звена постоянного тока далее рассматривается как функция не только глубины провала и мощности нагрузки, но также параметров фильтрации и коэффициента трансформации. После определения требуемого напряжения звена выполняется оценка энергетических возможностей накопителя и вычисляются его критические параметры: критическое напряжение, критический уровень заряда и допустимое время устойчивой компенсации. Изначально необходимо оценить требуемое напряжение на узле шунтирующей RC-ветви выходного звена $U_{RC,тр}$, которое определяется заданным добавочным напряжением ДКИН $U_{ДКИН,зад}$ и падением напряжения на утечках последовательной вторичной обмотки:

$$U_{RC,тр}(\delta) = k_{тр} \left(U_{ДКИН,зад}(\delta) + Z_{\sigma,2}(j\omega_1) I_{сети}(\delta) \right), \quad (1)$$

где δ — глубина провала; $U_{ДКИН,зад}$ — требуемое добавочное напряжение; $U_{RC,тр}$ — требуемое напряжение на RC-узле; $I_{сети}$ — ток сети; $k_{тр} = N_1/N_2$ — коэффициент трансформации; ω_1 — круговая частота основной гармоники; $Z_{\sigma,2}(j\omega_1) = R_{\sigma,2} + j\omega_1 L_{\sigma,2}$ — комплексное сопротивление утечек вторичной обмотки; $R_{\sigma,2}$ — активная составляющая утечек; $L_{\sigma,2}$ — индуктивность утечек.

Ток, связанный с компенсацией добавочного напряжения, можно привести к стороне инвертора через коэффициент трансформации:

$$I_{ДКИН}(\delta) = \frac{I_{сети}(\delta)}{k_{тр}}, \quad (2)$$

где $I_{ДКИН}$ — ток, соответствующий передаче мощности через ВДТ.

Шунтирующая RC-ветвь таким образом формирует дополнительный ток, протекающий в линии, зависящий от её импеданса:

$$Z_{RC}(j\omega) = R_{CR} + \frac{1}{j\omega C_{RC}}, I_{RC}(\delta) = \frac{U_{RC,тр}(\delta)}{Z_{RC}(j\omega_1)}, \quad (3)$$

где R_{CR} , C_{RC} — параметры RC-ветви; Z_{RC} — её комплексное сопротивление; I_{RC} — ток RC-ветви.

Тогда ток инвертора можно определить суммой токов:

$$I_{инв}(\delta) = I_{ДКИН}(\delta) + I_{RC}(\delta), \quad (4)$$

где $I_{инв}$ — ток на выходе инвертора.

Падение напряжения на последовательной RL-ветви фильтра выражается через её комплексное сопротивление:

$$Z_{RL}(j\omega) = R_{LR} + j\omega L_{LR}, U_{RL}(\delta) = Z_{RL}(j\omega_1) I_{инв}(\delta), \quad (5)$$

где R_{LR} , L_{LR} — параметры последовательной RL-ветви; Z_{RL} — её комплексное сопротивление; U_{RL} — падение напряжения на RL-ветви.

После чего требуемое фазное напряжение на стороне инвертора можно представить суммой напряжения на RC-узле и падения на RL-ветви:

$$U_{инв,тр}(\delta) = U_{RC,тр}(\delta) + U_{RL}(\delta), \quad (6)$$

где $U_{инв,тр}$ — требуемое фазное напряжение инвертора.

Соотношения (1)–(6) задают требуемый уровень $U_{инв,тр}$ и токовую нагрузку инвертора как функции параметров R_{LR} , L_{LR} , R_{CR} , C_{RC} и $k_{тр}$. Из условия достижимости $U_{инв,тр}$ при принятом способе формирования напряжения инвертором (ограничение по индексу модуляции) определяемое требуемое напряжение звена постоянного тока можно выразить как:

$$U_{DC,тр}(\delta) = \frac{2\sqrt{2}}{m_{макс}} | U_{инв,тр}(\delta), \quad (7)$$

где $U_{DC,тр}$ — требуемое напряжение звена постоянного тока; $m_{макс}$ — предельный индекс модуляции (для двухуровневого инвертора).

После задания уровня $U_{DC,тр}$ можно перейти к непосредственному расчёту критического уровня накопителя и допустимого времени компенсации. Мощность, требуемая со стороны звена постоянного тока при компенсации провала глубины δ , аппроксимируется и будет равна:

$$P_{DC}(\delta) \approx \frac{\delta P_{нагр}}{\eta}, \quad (8)$$

где P_{DC} — мощность со стороны звена постоянного тока; $P_{нагр}$ — активная мощность нагрузки; η — эквивалентный КПД силовой части.

Для суперконденсаторного накопителя, выбранного в качестве источника энергии, исходя из совокупности его преимуществ, эквивалентные параметры батареи задаются через параметры одного элемента и число соединений:

$$C_{эkv} = C_{ном} \frac{N_{пар}}{N_{посл}}, \quad (9)$$

$$R_{эkv} = ESR_{ном} \frac{N_{посл}}{N_{пар}}, \quad (10)$$

где $C_{эkv}$, $R_{эkv}$ — эквивалентные ёмкость и последовательное сопротивление батареи; $C_{ном}$ — номинальная ёмкость одного суперконденсатора; $ESR_{ном}$ — эквивалентное последовательное сопротивление одного суперконденсатора; $N_{посл}$, $N_{пар}$ — число последовательно и параллельно соединённых элементов.

Критическое напряжение накопителя в результате задаётся через требуемое напряжение звена постоянного тока и падение напряжения на эквивалентном сопротивлении при отдаче конечной мощности:

$$U_{нак,крит}(\delta) = U_{DC,тр}(\delta) + R_{эkv} \frac{P_{DC}(\delta)}{U_{DC,тр}(\delta)}, \quad (11)$$

где $U_{нак,крит}$ — критическое напряжение накопителя.

Допустимое время компенсации в результате определяется временем разряда накопителя от начального напряжения U_0 до $U_{нак,крит}(\delta)$ при квазипостоянном отборе мощности:

$$t_{доп}(\delta) = \frac{0,5 C_{эkv} (U_0^2 - U_{нак,крит}^2(\delta))}{P_{DC}(\delta)}, \quad (12)$$

где $t_{доп}$ — допустимое время устойчивой компенсации; U_0 — начальное напряжение накопителя.

Критический уровень заряда суперконденсаторной батареи определяется из энергетической интерпретации (энергия пропорциональна квадрату напряжения), поэтому в нормированном виде будет равен:

$$SoC_{крит}(\delta) = \frac{U_{нак,крит}^2(\delta)}{U_0^2}, \quad (13)$$

где $SoC_{крит}$ — критическое значение состояния заряда накопителя.

Полученные выражения показывают, что приближение напряжения накопителя к $U_{нак,крит}$ снижает возможность поддерживать заданную компенсацию, а при одновременном ухудшении демпфирования выходного звена возрастает риск перехода к колебательным режимам и сокращения $t_{доп}$. Для более точного определения конечных зависимостей и оценки влияния выделенных параметров необходимо выполнить моделирование работы системы с установленными параметрами, которое будет представлено далее.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом исследования таким образом является участок системы электроснабжения низшего напряжения 0,4 кВ с группой приводной и вспомогательной нагрузки, чувствительной к глубоким провалам напряжения. В качестве основных электроприёмников приняты асинхронные двигатели АИМУ-225М2 и АИМУ-180М4, а также статическая нагрузка собственных нужд (СН). СН является эквивалентной долей вспомогательных потребителей низкой мощности и моделирует питание шкафов управления и маломощных нагрузок, чтобы обеспечить реалистичное суммарное поведение шины в переходных режимах, включая влияние на токи в момент провала и на характер восстановления после компенсации и переключений. Номинальные и расчетные параметры, используемые для задания моделей двигателей и нагрузки, приняты по верификационной части модели шины 0,4 кВ и соответствуют компрессорному и вентиляторному характеру механической нагрузки (рис. 1). В модели также учтены кабельные линии выбранных потребителей, поскольку их активные и реактивные сопротивления влияют на динамику токов и напряжений при провале и при работе компенсатора. Структура самого устройства компенсации ДКИН принята типовой и включает силовой инвертор, звено постоянного тока с накопителем энергии, выходное фильтрующее звено и вольтодобавочный трансформатор. Накопитель задан как суперконденсаторная установка, а ее питание в модели учитывает конечное время восстановления уровня заряда, поскольку это влияет на повторную готовность ДКИН к компенсации и на корректность работы автоматики при повторных событиях. Компьютерная модель реализована в MATLAB Simulink и предназначена для воспроизведения провалов напряжения, регистрации напряжений до и после ДКИН, токов нагрузки и ветвей фильтра, напряжения и мощности звена постоянного тока, а также для проведения параметрических исследований по накопителю и по выходным звеньям

устройства. Отдельно в модели фиксируются сигналы состояния ДКИН, которые затем используются в логике защит и автоматики, включая признак активной компенсации, признак ограничения компенсации и признак приближения к предельному режиму.

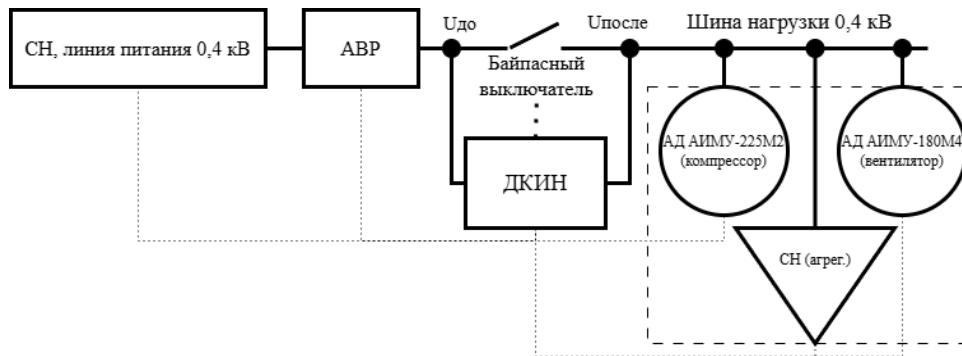


Рис. 1. Структура узла 0,4 кВ с ДКИН

Fig. 1. 0.4 kV section with DVR

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Предварительные результаты (рис. 2–3) моделирования режима работы системы для заданного объекта при провале глубиной 0,6 о.е. показывают, что варьирование параметров накопителя в основном лишь смещает критическую точку доступной компенсации ($U_{\text{нак,крит}}$, $SoC_{\text{крит}}$), но слабо влияет на характер конечного переходного процесса. При этом изменение данных параметров приводит лишь к полной остановке системы, с возможностью восстановления только после стабилизации напряжения на вышестоящей линии питания, не позволяя в значительной степени продлить время стабильной компенсации без значительного увеличения емкости. Так как изменения параметров источника не привели к значительным результатам, дальнейшие этапы верификации исходя из ранее полученных математических выражений будут основываться и оцениваться при варьировании параметров, расположенных вне звена постоянного тока — прежде всего параметров выходной фильтрации и вольтдобавочного трансформатора, которые через (1)–(6) и (13) определяют требуемый уровень $U_{\text{ДС,тр}}(\delta)$ и оказывают более существенное влияние на колебательный процесс.

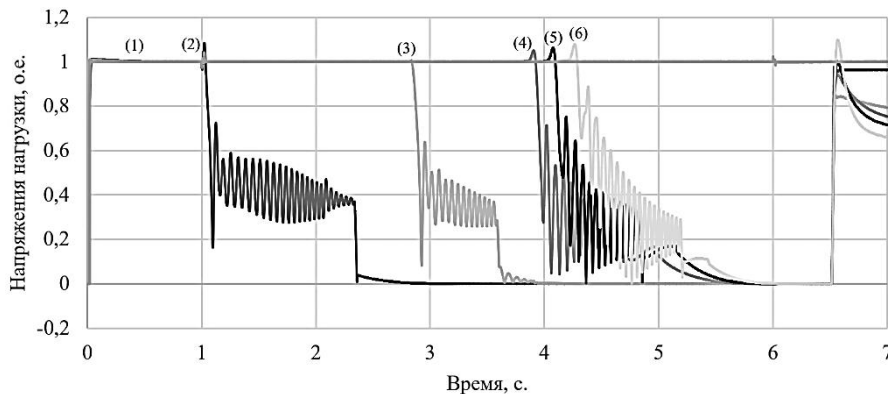


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (RMS) нагрузки при изменении сопротивления СУ и приближения к предельному режиму для падения напряжения в размере 0,6 о.е. в момент 1 с, с последующим восстановлением в 6,5 с при компенсации: 1 U_{ideal} ; 2 $10 \cdot R_{\text{экв}}$; 3 $5 \cdot R_{\text{экв}}$; 4 $R_{\text{экв}}$; 5 $0,5 \cdot R_{\text{экв}}$; 6 $0,1 \cdot R_{\text{экв}}$.

Fig. 2. Oscillograms of the load voltage (RMS) when varying the SU resistance and approaching the limiting operating mode, for a voltage drop of 0.6 p.u. at $t = 1$ s with subsequent recovery at $t = 6,5$ s: 1 U_{ideal} ; 2 $10 \cdot R_{\text{eq}}$; 3 $5 \cdot R_{\text{eq}}$; 4 R_{eq} ; 5 $0,5 \cdot R_{\text{eq}}$; 6 $0,1 \cdot R_{\text{eq}}$.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Имитационное моделирование и верификация исходя из предыдущих тезисов проводились для двух сценариев возмущений:

1.режим работы системы с возникновением возмущения электропривода при набросе нагрузки в 2 раза в интервале $t = 1 - 6$ с, сопровождаемый провалом напряжения на стороне сети глубиной 0,6 о.е. в $t = 7 - 12$ с;

2.режим работы системы с возникновением внешнего провала напряжения глубиной 0,4 о.е. в интервале $t = 1 - 8$ с.

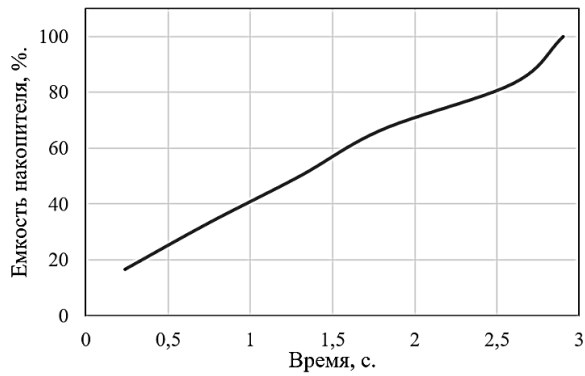


Рис. 3. Зависимость допустимого времени компенсации от емкости СУ для провала напряжения в размере 0,6 о.е.
 Fig. 3. Dependence of the allowable compensation time on the SU capacitance for a voltage sag of 0.6 p.u.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для каждого сценария рассматриваются четыре варианта реализации системы:

1. без условий стабилизации переходного процесса, без отстройки комбинированной логики защит;
2. без условий стабилизации переходного процесса, с комбинированной настройкой защит;
3. со стабилизацией переходного процесса, без отстройки комбинированной логики защит;
4. со стабилизацией переходного процесса, с комбинированной настройкой защит.

Остальные исходные параметры системы в пределах каждой итерации оставались неизменными, что обеспечивает сопоставимость результатов и позволяет выделить вклад исследуемых настроек в устойчивость компенсации и динамику переходных процессов.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В результате проведения опытов по стабилизации переходного процесса в критическом режиме работы компенсатора были выделены оптимальные значения параметров компенсатора при неизменных значениях накопительного устройства, что позволило отказаться от дальнейшего варьирования ранее исследованных параметров и сосредоточиться на наиболее влиятельных переменных.

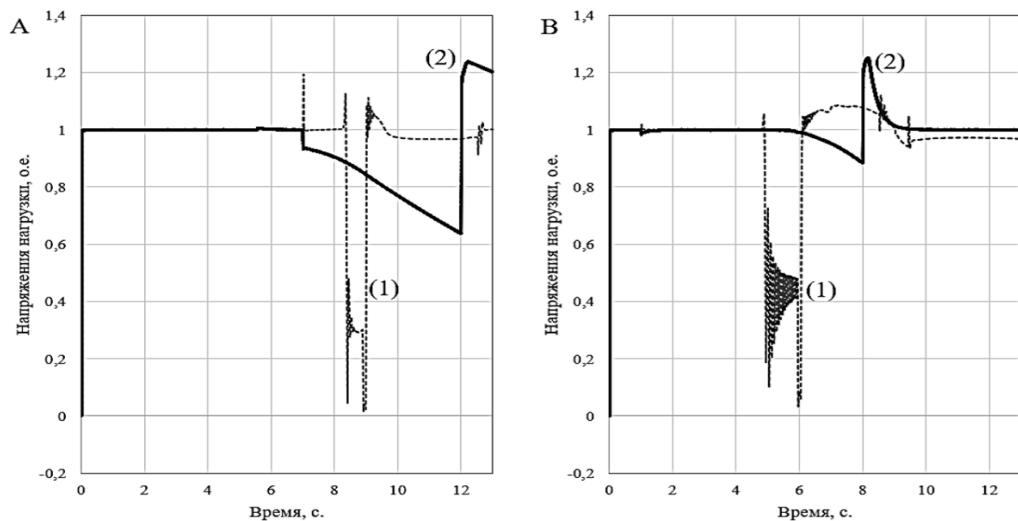


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (RMS) нагрузки при компенсации: А – провал 0,2 о.е., при $t = 5$ с, и провал 0,6 о.е. при $t = 5$ с; В – провал 0,6 о.е., при $t = 7$ с; 1 – при старых параметрах ДКИН; 2 – при новых параметрах ДКИН.
 Fig. 4. Load voltage (RMS) waveforms during compensation: A – 0.2 p.u. sag at $t = 5$ s and 0.6 p.u. sag at $t = 5$ s; B – 0.6 p.u. sag at $t = 7$ s. 1 – DVR with previous parameters; 2 – DVR with updated parameters.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

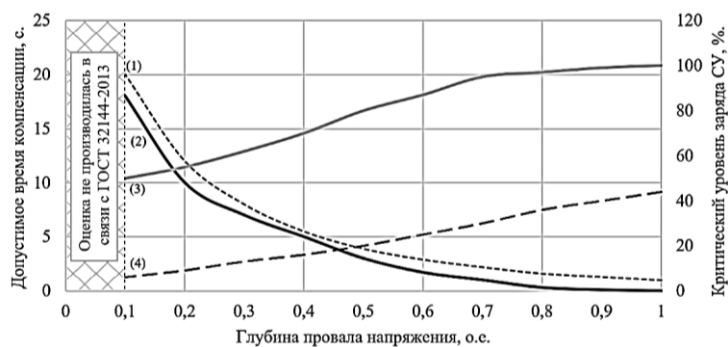


Рис. 5. Смещение границы устойчивой компенсации при изменении параметров системы: $t_{доп}(\delta)$ и $SoC_{крит}(\delta)$: 1 – $t_{доп}(\delta)$ при старых параметрах ДКИН; 2 – $t_{доп}(\delta)$ при новых параметрах ДКИН; 3 – $SoC_{крит}(\delta)$ при новых параметрах ДКИН; 4 – $SoC_{крит}(\delta)$ при старых параметрах ДКИН.

Fig. 5. Shift of the stable compensation boundary when the system parameters change: $t_{доп}(\delta)$ and $SoC_{крит}(\delta)$: 1 – $t_{доп}(\delta)$ with the old DVR parameters; 2 – $t_{доп}(\delta)$ with the new DVR parameters; 3 – $SoC_{крит}(\delta)$ with the new DVR parameters; 4 – $SoC_{крит}(\delta)$ with the old DVR parameters.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При циклическом выборе параметров конечной фильтрации, исходя из неизменности показаний в штатном режиме и соблюдения частотно-резонансных характеристик фильтра для стабильного подавления гармонических составляющих, в момент активации компенсации и перехода в нестабильный режим, удалось добиться оптимальных параметрических установок (рис. 4). Для двух режимов работы системы с учетом возникновения провалов напряжения, вызванных увеличением момента нагрузки и провалом напряжения с глубиной 0,6 о.е., а также отдельным провалом напряжения с глубиной 0,4 о.е. удалось полностью исключить выявленную колебательность системы (рис. 4А(2) и 4В(2)). Однако при этом границы конечной допустимой компенсации оказались существенно смещены как по уровню критического заряда, так и по допустимому времени компенсации (рис. 5). Фактически после изменения параметров система стала предъявлять более жесткие требования к накопителю. Чтобы удерживать режим компенсации без перехода в предельное состояние, системе, исходя из ранее полученных данных, необходим более высокий уровень заряда и напряжения накопителя. Вне данных условий достижение критической точки происходит быстрее, что напрямую связано с тем, что перенастройка выходных звеньев цепи меняет ранее выделенные ключевые параметры системы. При росте требуемого напряжения на стороне инвертора требуется поддерживать более высокий уровень DC-напряжения, из-за чего критическая точка по уровню заряда смещается вверх и накопитель достигает предельного режима уже при более высоком SoC. Аналогично, увеличение дополнительных токов и потерь в выходных звеньях повышает фактическую мощность, снимаемую с накопителя, ускоряет разряд и сокращает допустимое время компенсации.

Возвращаясь к оценке проведенного опыта, полученные данные показывают значительные изменения в самом переходном процессе по истечении времени компенсации, а также в характере восстановления напряжения. Полученные результаты отвечают поставленной задаче и подтверждают ранее сформулированные выводы. Однако в случае изменённых параметров наблюдается более выраженный восстановительный процесс по амплитуде импульса и по времени выхода напряжения к номинальному уровню после восстановления питания. Такой характер обусловлен тем, что при изменении параметров выходного фильтрующего звена меняются эквивалентные демпфирующие свойства и фазочастотные характеристики выходной цепи, вследствие чего смещается точка, в которой обеспечивается требуемое сглаживание коммутационных составляющих и подавление динамических отклонений напряжения на стороне нагрузки. При неизменной частоте среза конечных фильтров перераспределение сопротивлений и реактивностей в звене приводит к изменению динамических свойств преобразовательной части, а значит также влияет и на формы отклика при переключении режимов и восстановлении напряжения. Дополнительно следует учитывать, что в момент начала компенсации для новых параметров системы питающее напряжение уже снижено провалом напряжения, вызванным набросом нагрузки на двигатель и его отключением, поэтому переход в режим компенсации происходит при уменьшенной жесткости источника и повышенной чувствительности системы к параметрам

фильтрации. В этих условиях после окончания интервала компенсации формируется кратковременный, но более интенсивный переходный процесс, связанный с изменением баланса мощностей и переформированием напряжения на стороне нагрузки. При этом длительность такого процесса остаётся недостаточной для срабатывания защит по минимальному напряжению и по перегрузке при принятых выдержках времени, а также не приводит к запуску АВР. Для первичных параметров системы включение АВР происходит штатно, однако сопровождается заметным интервалом работы нагрузки при пониженном напряжении и кратковременным снижением напряжения до нуля в момент коммутации.

Таким образом, характер переходных процессов при внедрении ДКИН и особенно при изменении его параметров становится фактором, напрямую влияющим на условия срабатывания защит и последовательность переключений. В связи с этим возникает вопрос, который был поставлен ранее, а именно, реализация комбинированной логики срабатывания защит как ДКИН, так и отдельных потребителей, а также АВР. С учётом достигнутой стабилизации переходного процесса выделяется также дополнительная задача использования сформированного запаса устойчивого и плавного снижения напряжения до допустимого минимума как временного ресурса компенсации, применяемого для согласования работы ДКИН с защитами и АВР, исключения преждевременных отключений и сокращения избыточных коммутаций. Реализация такой согласованной последовательности действий и описывается ниже в виде комбинированной логики, где компенсация, диагностика и защитные функции увязаны по условиям срабатывания и по признакам восстановления режима.

Исходя из полученных данных о значительном влиянии параметров источника питания на продолжительность конечной возможности компенсации, представленная логика (рис. 6) реализуется на базе циклического анализа состояния питания и нагрузки, а также качества напряжения на стороне потребителей с разнесением контроля до ДКИН и после ДКИН. Построенная логика таким образом включает компенсационные, диагностические и защитные действия, рассматриваемые как элементы единого переходного процесса.

В изначальном состоянии компенсатор находится в режиме ожидания и выполняет пассивный контроль напряжения на конечной нагрузке, а также отслеживает состояние накопителя, включая подзаряд звена постоянного тока. При снижении напряжения ниже порогового уровня на контролируемой линии $U_{\text{порог}}$ фиксируется событие провала и запускается первичный цикл анализа причин, представленный на схеме штриховыми контурами и обратными связями. В этом цикле сопоставляются измерения на стороне среднего уровня напряжения (СН) по данным вышестоящего измерительного трансформатора, уровни напряжения после трансформации СН и до входа ДКИН, а также предыстория состояния нагрузки, включая параметры электроприводов и их нагрузку до начала события и при его непосредственном приближении. По результатам сопоставления формируются признаки, указывающие на наиболее вероятный источник нарушения режима и возможный проблемный участок. Данные признаки используются при выборе дальнейшей ветви алгоритма. При отсутствии провала либо при незначительном отклонении, когда $U^* > U_{\text{порог}}$, система сохраняет режим ожидания. Параллельно действует диагностическая ветвь, в которой при несоответствии входного напряжения или параметров нагрузки допустимым условиям формируется предупреждение о неопределённой причине провала и допускается компенсация только до предельного режима, а при обнаружении неисправности ДКИН выполняется его отключение с обесточиванием и сигнализацией кода ошибки.

После подтверждения существенного провала определяется его принадлежность диапазону компенсации ДКИН ($U_{\text{min}} \leq U^* < U_{\text{max}}$). Если провал относится к рабочей области компенсации, либо при значительно более глубоком провале дополнительно подтверждена доступность резерва по АВР, формируется задание на добавочное напряжение $U_{\text{ДКИН,зад}}(\delta)$, и ДКИН переходит в режим компенсации, поддерживая напряжение на стороне нагрузки. Если провал выходит за выбранный диапазон компенсации и является наиболее глубоким, выполняется проверка доступности резерва по уровню напряжения на смежной линии питания и исправности ввода. При достаточном уровне напряжения резерва и готовности коммутационного аппарата допускается включение компенсации как переходного средства на время подготовки переключения. При недостаточном уровне напряжения резерва либо при неисправности ввода переключение на резерв блокируется, а дальнейшие действия определяются возможностями ДКИН и выбранными защитными функциями.

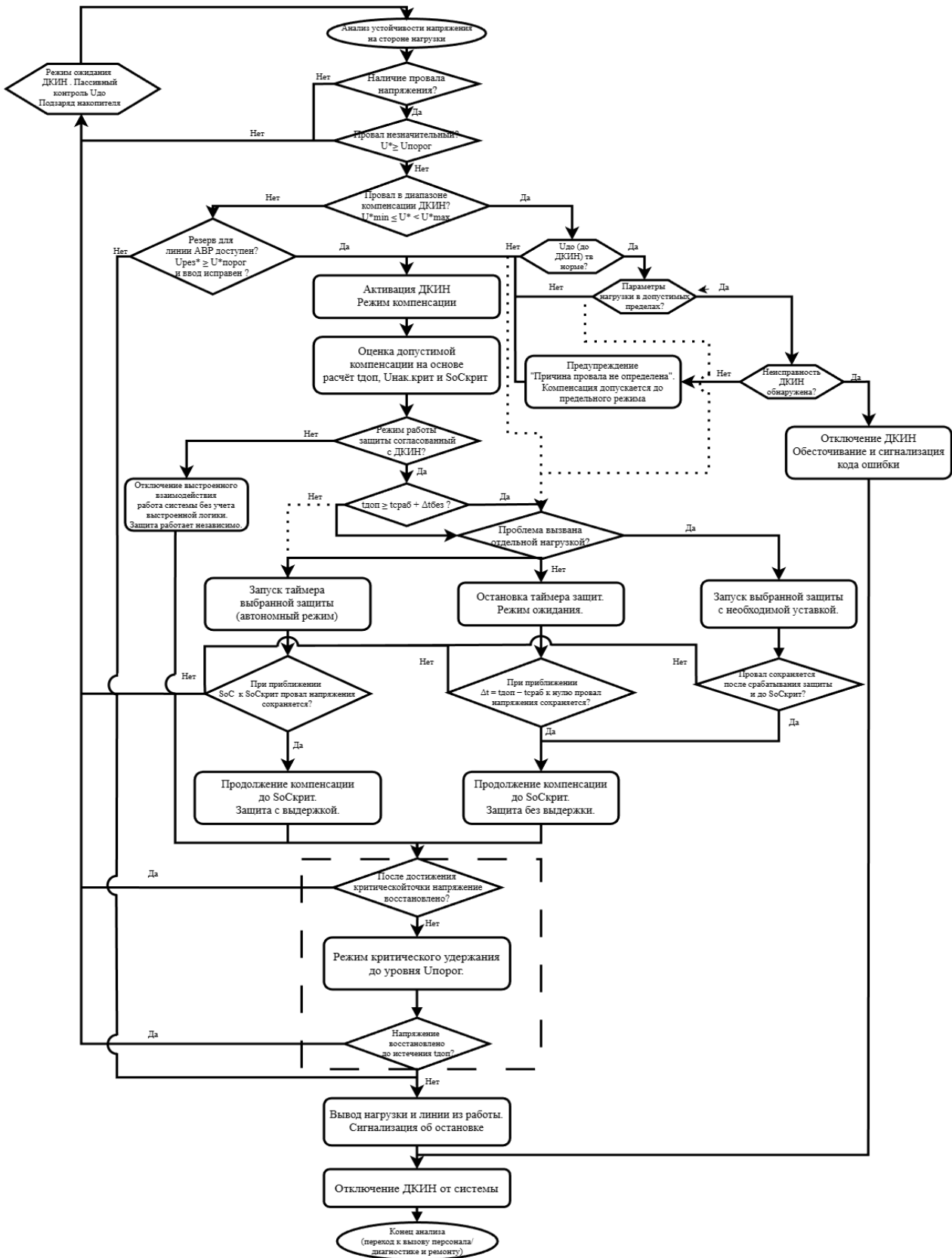


Рис. 6. Блок-схема работы системы управления защитой ДКИН с формированием сигнала предельного режима для внешней автоматики.

Fig. 6. Block diagram of the operation of the DVR protection control system with generation of a limit-mode signal for external automation.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При этом стоит отметить, что эти этапы анализа могут быть реализованы в логике защиты в случае использования ранее указанных микропроцессорных контроллеров и

других быстродействующих устройств автоматики, которые позволяют провести выборку данных за время, не превышающее допустимого интервала ввода ДКИН в работу.

Одновременно с переходом в режим компенсации оценивается допустимость её продолжения по энергетическим ограничениям накопителя, для чего рассчитываются либо задаются $t_{\text{доп}}(\delta)$, $U_{\text{нак,крит}}(\delta)$ и $SoC_{\text{крит}}(\delta)$, определяющие границу устойчивой работы звена постоянного тока и допустимую длительность поддержания требуемой компенсации. Дальнейшие действия определяются наличием согласованного режима работы защит с ДКИН. Возможность согласования предусматривается как для штатной эксплуатации, так и для режимов пуска наладки и ремонта, когда требуется автономная работа защит и уточнение параметров по результатам экспериментальной оценки. При отсутствии согласования комплекс защитных устройств функционирует независимо, а компенсация рассматривается как локальная мера повышения устойчивости нагрузки. При наличии согласования энергетический ресурс ДКИН сравнивается с требуемым временем срабатывания выбранной защитной функции. При достаточном запасе $t_{\text{доп}} \geq t_{\text{сраб}} + \Delta t_{\text{без}}$ запускается таймер защиты, и компенсация продолжается до достижения $SoC_{\text{крит}}$ при сохранении выдержки. При сокращении запаса компенсация допускается до $SoC_{\text{крит}}$, а действие защиты переводится в режим минимальной выдержки вплоть до достижения максимально допустимого уровня напряжения, что исключает выход ДКИН за энергетический предел. Ветвь, в которой провал интерпретируется как следствие отдельной нагрузки, приводит к запуску выбранной защиты с необходимой уставкой, не блокируя ее работу, что позволяет локализовать возмущение и сохранить работоспособность остальных участков системы с уменьшением вероятности дополнительных переходных процессов из-за избыточных коммутаций. В режиме ожидания таймеры защит останавливаются при наличии признаков восстановления или отсутствия системного нарушения и возобновляются только при подтверждении сохранения провала по напряжению до ДКИН.

После достижения критического уровня по напряжению накопителя, SoC или по времени ресурса проверяется восстановление напряжения вне зоны компенсации по напряжению до ДКИН. В логике также учитывается, что предварительный подбор параметров выходного звена и его соответствие конечному переходному процессу позволяет увеличить время допустимой компенсации до заданной критической уставки по напряжению на нагрузке и обеспечить работу при более тяжёлых возмущениях без раннего перехода к отключению системы, что расширяет полезный диапазон компенсации относительно типовых границ срабатывания защит. При сохранении нарушения питания формируется сигнал предельного режима, который используется внешней автоматикой как приоритетный признак необходимости защитных действий и не трактуется как восстановление питания. Переходя к описанию данного сценария, при отсутствии восстановления питания вводится режим критического удержания, при котором выполняется ограниченная компенсация до уровня $U_{\text{порог}}$, позволяющая кратковременно избежать резкого провала на нагрузке. Если напряжение не восстанавливается до истечения допустимого времени с учетом отключения нагрузки или перевода системы на резервный источник, выполняется вывод нагрузки и линии из работы с сигнализацией об остановке и последующим отключением ДКИН от системы. Такой порядок работы обеспечивает компенсацию настолько долго, насколько это допускают условия устойчивой работы звена постоянного тока и компенсатора в целом, и предотвращает ненужные отключения и повторные переключения. При низком напряжении на резервной линии АВР остаётся заблокированным, а при стабилизации сети в процессе компенсации отсчёт выдержки прерывается, что исключает переключение при восстановлении питания во время работы ДКИН.

Касаясь отстройки логики устройств автоматики, для упрощённой реализации защиты минимального напряжения (ЗМН) и защиты от перегрузки, принята схема с выдержкой времени при снижении напряжения ниже уставки, в которой предусматривается логическая блокировка на интервал переключения АВР, что исключает одновременные действия двух автоматических устройств на одном событии, а также формирование признака окончания переходного процесса по восстановлению напряжения после переключения. Для АВР реализована схема двухходового питания на основе сравнения действующих значений напряжений основного и резервного вводов с уставками, с выдержками времени на подтверждение аварийного режима, на отключение с контролем восстановления питания (рис. 7). Для согласования АВР с режимами компенсации в логический контроллер АВР введён информационный вход от ДКИН, так же, как и для других типов защит. При формировании сигнала предельного режима АВР инициирует переключение на резерв до начала развития слабодемпфированных колебаний выходного

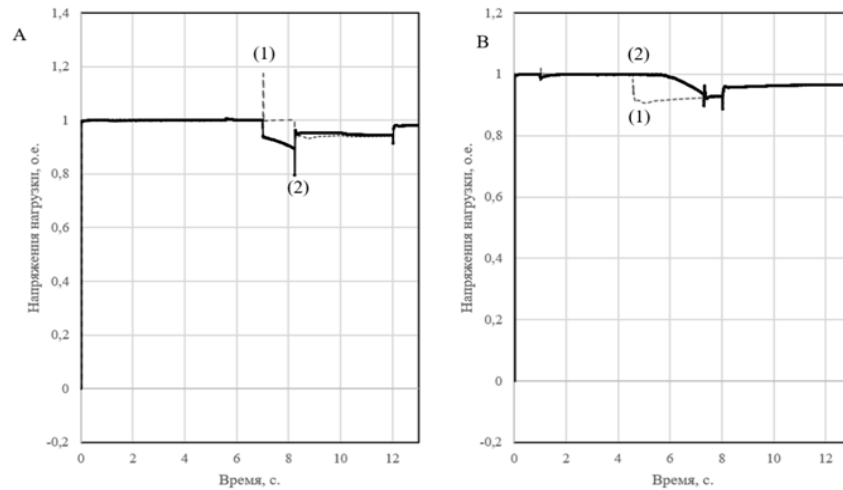


Рис. 8. Осциллограммы напряжения (RMS) нагрузки при компенсации: А – провал 0,2 о.е., при $t = 5$ с, и провал 0,6 о.е. при $t = 5$ с; В – провал 0,6 о.е., при $t = 7$ с; 1 – при старых параметрах ДКИН; 2 – при новых параметрах ДКИН.

Fig. 8. Load voltage (RMS) waveforms during compensation: A – 0.2 p.u. sag at $t = 5$ s and 0.6 p.u. sag at $t = 5$ s; B – 0.6 p.u. sag at $t = 7$ s 1 – DVR with previous parameters; 2 – DVR with updated parameters.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

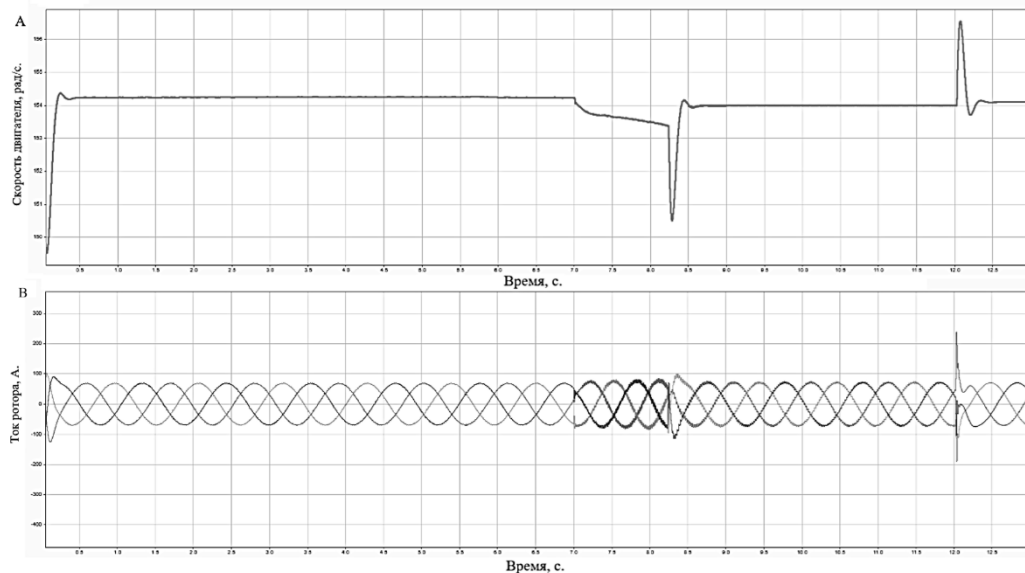


Рис. 9. Параметры двигателя АИМУ-180М4 при конечной модификации системы защит и стабилизации переходного процесса: А – скорость вращения двигателя; В – ток ротора двигателя.

Fig. 9. Parameters of the AIMU-180M4 motor under the final modification of the protection and transient-process stabilization system: A - motor rotational speed; B - motor rotor current.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Суммируя вышеизложенный результат, можно сказать, что:

1. согласование ДКИН с защитами обеспечивает управляемое использование окна устойчивой компенсации, предотвращая провалы напряжения на нагрузке в интервале коммутации и исключая развитие слабодемпфированных колебаний;

2. сформированный временной резерв в результате проведения оптимизации параметров ДКИН позволяет повысить селективность и результативность защитных действий без избыточных переключений, снижая длительность перерыва питания и эксплуатационные нагрузки на оборудование.

Заключение (Conclusions)

Проведённое исследование показало, что применение ДКИН должно рассматриваться как совместная задача силовой части и алгоритмов взаимодействия с автоматикой и защитным оборудованием, поскольку именно при их согласовании и

комбинированном использовании возможно определить и добиться наиболее устойчивого переходного процесса и корректности защитных и коммутационных действий в низковольтных линиях питания с приводной и вспомогательной нагрузкой, чувствительной к глубоким провалам напряжения. Построенная имитационная модель в программном комплексе MATLAB Simulink позволила воспроизвести реалистичное суммарное поведение шины для выбранных сценариев и оценить влияние компенсации на конечную линию в момент восстановления с учетом характера последующего переходного процесса.

Параметрическая оптимизация накопителя энергии и выходных звеньев ДКИН, включая настройку фильтрации и других параметров системы, позволила расширить границы управляемого переходного процесса и увеличить интервал устойчивой компенсации без выхода в предельные режимы звена постоянного тока, что особенно важно с учётом конечного времени восстановления уровня заряда накопителя и требований к повторной готовности устройства. За счёт этого становится возможным формирование более продолжительного и предсказуемого режима работы при провалах напряжения и последующих переключениях, в результате чего снижается выраженность неблагоприятных переходных явлений и формируются условия для выполнения селективных действий с меньшим риском внештатных срабатываний и с меньшей глубиной ухудшения питания чувствительной нагрузки. Построенная логика защит и автоматики, использующая признаки активной компенсации в дополнение к стабилизации переходного процесса, обеспечивает согласование момента переключений с текущими возможностями ДКИН и предотвращает доведение устройства до энергетического предела и в значительной степени стабилизирует конечные переходные процессы. При этом предложенная логика взаимодействия использует параметры, традиционно рассматриваемые как внутренние для ДКИН, в частности SoC и напряжение звена постоянного тока $U_{\text{нак}}$, в качестве входных сигналов для внешней автоматики, что представляет собой новый подход к интеграции компенсатора с устройствами защиты и автоматики. В результате компенсация перестаёт быть изолированной функцией восстановления напряжения и становится управляемым ресурсом системы, повышающим предсказуемость обеспечения устойчивости питания и снижающим вероятность развития слабодемпфированных колебаний, негативных переходных процессов, а также иных режимных отклонений при повторных событиях искажений напряжения.

Литература

1. Скопин Г.А. Анализ программных средств для исследования функционирования динамических компенсаторов искажений напряжения // Нефть и газ — 2024. 2024. С. 820-821.
2. Дзюин Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 49-62. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.
3. Анализ взаимодействия динамического компенсатора искажений напряжения с системами релейной защиты и автоматики // Фёдоровские чтения 2025: материалы конференции. 2025. ISBN 978-5-7046-3297-9. URL: <http://epp.mpei.ru/fedchten/>.
4. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Васильев В.В. Использование устройств динамического восстановления напряжения в электрических сетях 0,4 кВ // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17. № 3(82). С. 119-132. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_119.
5. Abdelaal A.K. et al. Sliding mode control based dynamic voltage restorer for voltage sag compensation // Results in Engineering. 2024. Vol. 24 (102936). DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936.
6. Huang L. et al. Modulation strategy of dynamic voltage restorer based on dual-feedforward active disturbance rejection compound controller // Frontiers in Energy Research. 2024. Vol. 12 (1462565). DOI: 10.3389/fenrg.2024.1462565.
7. Soomro A.H. et al. Enhancement of power quality based on dynamic voltage restorer matrix inverter-sliding mode control scheme // Electric Power Systems Research. 2025. Vol. 241 (111408). DOI: 10.1016/j.epsr.2025.111408.
8. Li S. et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Integrated Energy Optimal Compensation // Electronics. 2023. Vol. 12. № 3 (531). DOI: 10.3390/electronics12030531.

9. Nori A.M. et al. Enhancing Fault Ride-Through and Power Quality in Wind Energy Systems Using Dynamic Voltage Restorer and Battery Energy Storage System // *Electronics*. 2025. Vol. 14. № 14 (2760). DOI: 10.3390/electronics14142760.

10. Абрамович Б.Н., Богданов И.А. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // *Записки Горного института*. 2021. Т. 249. С. 408-416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

11. Manju A.S. et al. Design and control of LCC DVR // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15 (25730). DOI: 10.1038/s41598-025-07618-x.

12. Alasali F. et al. The recent development of protection coordination schemes based on inverse of AC microgrid: A review // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2024. DOI: 10.1049/gtd2.13074.

13. Shyamaprasad A. et al. Field analysis of directionality measurement with inverter-based distributed energy resource system // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2025. DOI: 10.1049/gtd2.70008.

14. Li J. et al. Optimal protection coordination for directional overcurrent relays in radial distribution networks with inverter-based distributed energy resources // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2025. Vol. 167 (110622). DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110622.

15. Amogne Y. et al. Fault current limiting dynamic voltage restorer for power quality improvement in distribution system // *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2025. DOI: 10.1186/s43067-025-00233-w.

Авторы публикации

Скопин Георгий Андреевич – аспирант РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. *Email*: asostrak@gmail.com.

Комков Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. *Email*: komkov.a@gubkin.ru.

References

1. Skopin GA. Analysis of software tools for studying operation of dynamic voltage distortion compensators. *Neft' i gaz* — 2024. 2024:820-821. (In Russ.). (eLIBRARY ID: 72011737).

2. Dzyuin DV, Skopin GA, Komkov AN, Dmitrieva VV. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(2):49-62. (In Russ.). DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.

3. Interaction analysis of a dynamic voltage distortion compensator with relay protection and automation systems. In: *Fyodorovskie chteniya 2025: conference proceedings*. 2025. ISBN 978-5-7046-3297-9. Available at: <http://epp.mpei.ru/fedchten/>.

4. Afonichev DN, Pilyaev SN, Vasil'ev VV. Ispol'zovanie ustroystv dinamicheskogo vosstanovleniya napryazheniya v elektricheskikh setyakh 0.4 kV. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024;17(3(82)):119-132. (In Russ.). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_119.

5. Abdelaal AK, et al. Sliding mode control based dynamic voltage restorer for voltage sag compensation. *Results in Engineering*. 2024;24:102936. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936.

6. Huang L, et al. Modulation strategy of dynamic voltage restorer based on dual-feedforward active disturbance rejection compound controller. *Frontiers in Energy Research*. 2024;12:1462565. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1462565.

7. Soomro AH, et al. Enhancement of power quality based on dynamic voltage restorer matrix inverter-sliding mode control scheme. *Electric Power Systems Research*. 2025;241:111408. DOI: 10.1016/j.eprsr.2025.111408.

8. Li S, et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Integrated Energy Optimal Compensation. *Electronics*. 2023;12(3):531. DOI: 10.3390/electronics12030531.

9. Nori AM, et al. Enhancing Fault Ride-Through and Power Quality in Wind Energy Systems Using Dynamic Voltage Restorer and Battery Energy Storage System. *Electronics*. 2025;14(14):2760. DOI: 10.3390/electronics14142760.

10. Abramovich BN, Bogdanov IA. Povyshenie effektivnosti avtonomnykh elektrotekhnicheskikh kompleksov neftegazovykh predpriyatii. Zapiski Gornogo instituta. 2021;249:408-416. (In Russ.). DOI: 10.31897/PML.2021.3.10.

11. Manju AS, et al. Design and control of LCC DVR. Scientific Reports. 2025;15:25730. DOI: 10.1038/s41598-025-07618-x.

12. Alasali F, et al. The recent development of protection coordination schemes based on inverse of AC microgrid: A review. IET Generation, Transmission & Distribution. 2024. DOI: 10.1049/gtd2.13074.

13. Shyamaprasad A, et al. Field analysis of directionality measurement with inverter-based distributed energy resource system. IET Generation, Transmission & Distribution. 2025. DOI: 10.1049/gtd2.70008.

14. Li J, et al. Optimal protection coordination for directional overcurrent relays in radial distribution networks with inverter-based distributed energy resources. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2025;167:110622. DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110622.

15. Amogne Y, et al. Fault current limiting dynamic voltage restorer for power quality improvement in distribution system. Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2025. DOI: 10.1186/s43067-025-00233-w.

Authors of the publication

Georgy A. Skopin – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. *Email:* asostrak@gmail.com.

Aleksandr N. Komkov – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. *Email:* komkov.a@gubkin.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **25.02.2026 г.**

Отредактировано **01.04.2026 г.**

Принято **14.04.2026 г.**