

# СТАНЦИЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

АНАТОЛИЙ ВИНОГРАДОВ, ДМИТРИЙ ИЗОСИМОВ, СТАНИСЛАВ ФЛОРЕНЦЕВ, АЛЕКСАНДР КОРОТКОВ

## ВВЕДЕНИЕ

Станция автономного электроснабжения (АСЭ) предназначена для автономного электропитания стабилизированным трехфазным напряжением 380/220 В, 50 Гц, потребителей общего назначения (технологическое и промышленное оборудование, компьютерное и телекоммуникационное оборудование, охранные и противопожарные системы и т.д.) при питании от первичного источника. Максимальный эффективный выходной ток каждой фазы АСЭ составляет 300 А, максимальная активная мощность — 180 кВт. В качестве первичного источника рассматривается звено постоянного тока, имеющее номинальное напряжение 800 В и позволяющее производить отбор мощности до 200 кВт. Конкретно АСЭ проектируется для использования в составе опционального устройства трактора с электромеханической трансмиссией ЭТ-300 ЦП (производство РУПП МТЗ, Минск), в котором звено постоянного тока образовано двигателем внутреннего сгорания и мотор-генератором комплекта тягового электрооборудования.

Схема автономного источника питания (см. рис. 1) включает следующие элементы:

- двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
- асинхронный мотор-генератор (МГ), питаемый от 3-фазного мостового

IGBT-выпрямителя с системой векторного управления (СУ МГ);

- емкостный фильтр звена постоянного тока (ЗПТ);
- 3-фазный мостовой IGBT-инвертор с системой векторного управления автономной станцией энергоснабжения (СУ АСЭ);
- выходной синус-фильтр;
- датчики выходных фазных токов и напряжений АСЭ;
- систему управления верхнего уровня.

Датчики напряжения ЗПТ и фазных токов IGBT-преобразователей являются внутренними элементами преобразователей и на схеме не показаны. Выход АСЭ подключается к электроприемникам (трехфазным или однофазным).

Характерными особенностями АСЭ ЭТ-300 ЦП являются:

- возможность 3-проводного и 4-проводного подключения нагрузки;
- сохранение высоких качественных показателей выходного напряжения при различных типах нагрузок: линейной и нелинейной, активного, индуктивного и емкостного характера, симметричной и несимметричной;
- высокая устойчивость к перегрузкам и коротким замыканиям;
- возможность прямого пуска асинхронного двигателя мощностью, соизмеримой с номинальной мощностью АСЭ;

- стационарное и мобильное исполнение;
- высокий КПД (>95%).

## ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Система управления приводом МГ характеризуется следующим особенностями [1]:

- требование оптимизации управления по критерию минимизации потерь в силовом электрооборудовании транспортного средства приводит к необходимости широкого диапазона регулирования потокосцепления, практически от нуля в режиме холостого хода до существенного перемагничивания в режимах работы с предельным моментом;
- широкий диапазон изменения потокосцепления электрических машин и рабочих температур приводит к значительным вариациям их электромагнитных параметров, что предполагает наличие алгоритмов адаптации системы управления к этим изменениям в реальном времени работы системы;
- система измерения скорости/положения получает исходную информацию с достаточно грубого датчика перемещения (зубчатого колеса с небольшим числом зубцов — 128 шт.), что предполагает наличие специальных алгоритмов обработки сигналов, поступающих с датчика, на основе построения наблюдателей состояния механической части привода.

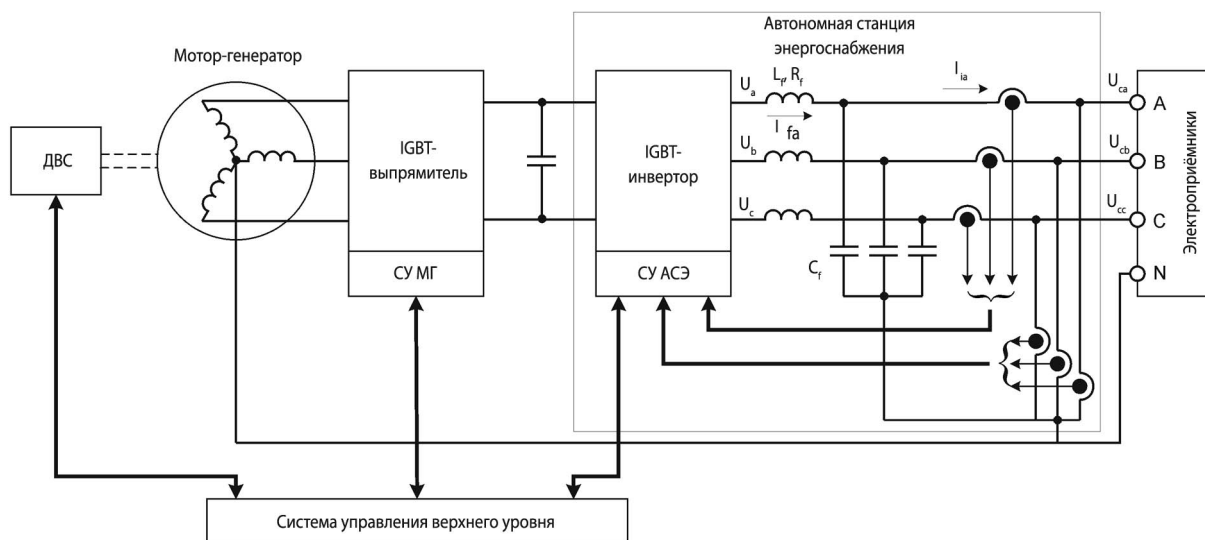


Рис. 1. Структурная схема автономного источника питания на основе КТЭО транспортного средства с электромеханической трансмиссией

В дополнение к этим особенностям привода МГ, практически универсальных для большинства транспортных средств с электромеханической трансмиссией, можно добавить ряд уникальных требований, которые предъявляются к приводу МГ со стороны АСЭ, т.е. напрямую связанных с показателями качества электроэнергии, поступающей потребителям:

- относительно малая емкость ЗПТ (3...8 мФ) предъявляет повышенные требования к динамическим характеристикам привода МГ. Необходимое быстродействие привода, главным образом, определяется суммарной емкостью ЗПТ и допустимой величиной динамических пульсаций напряжения ЗПТ в связи с возможными резкими изменениями нагрузки;
- при работе в 4-проводной 3-фазной системе питания с нейтраль-

ным проводом, который подключен к общей точке статорных обмоток МГ, соединенных «в звезду», предъявляются дополнительные требования к стабильности среднего за цикл модуляции потенциала общей точки, т.е. к способу формирования широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В отличие от широко распространенного в современном цифровом электроприводе переменного тока векторного формирования ШИМ [2], в системах питания применяется ШИМ на основе сравнения трехфазных сигналов задания с пилообразным опорным сигналом. Таким образом, приходится мириться с некоторым недоиспользованием автономного инвертора привода по напряжению, получаемым в рамках такого подхода при синусоидальном законе модуляции. При переходе КТЭО в основной (тяговый) режим работы в приводе МГ осуществляется

возврат к векторному формированию ШИМ, что обеспечивает максимальное использование напряжения ЗПТ.

Блок-схема алгоритмов работы моментного контура МГ с адаптивно-векторным управлением представлена на рисунке 2. Внешним по отношению к моментному контуру системы управления МГ является контур регулирования напряжения ЗПТ, работающий в режиме стабилизации напряжения.

Система управления верхнего уровня согласует работу отдельных элементов автономного источника питания (ДВС, приводы МГ, АСЭ) во всех режимах: рабочих и аварийных.

Система управления АСЭ (см. рис. 3) выполнена на основе модального регулятора, реализованного в синхронной системе координат ( $dqo$ ) с учетом компенсации внешних воздействий и перекрестных связей, с статизмом 1-го порядка по выходному напряжению АСЭ. Ось  $d$  синхронной системы координат ориентирована по вектору  $U_c$  выходного напряжения АСЭ. Дополнительно в систему управления входят координатные преобразования ( $ABC \rightarrow dqo$ ) [2] фазных токов инвертора  $I_r$ , выходных фазных токов  $I_i$  и напряжений АСЭ, обратное координатное преобразование ( $dqo \rightarrow ABC$ ) заданных напряжений инвертора  $U$ , алгоритмы компенсации запаздывания, ограничения заданного напряжения и двухуровневого ограничения выходного тока.

Регулятор АСЭ вычисляет заданные напряжения инвертора в системе координат ( $dqo$ ) по выражениям:

$$U_d^* = \text{PiRegLim}(k_{u1}, k_{u2}, U_{cd}^* - U_{cd}) + U_{cd}^* + k_f I_{fd} + (R_f - k_i) I_{fd} - L_f \omega I_i;$$

$$U_q^* = k_f I_{fq} + (R_f - k_i) (I_{fq} + C_f \omega U_{cd}) + L_f \omega I_{fd}; \quad (1)$$

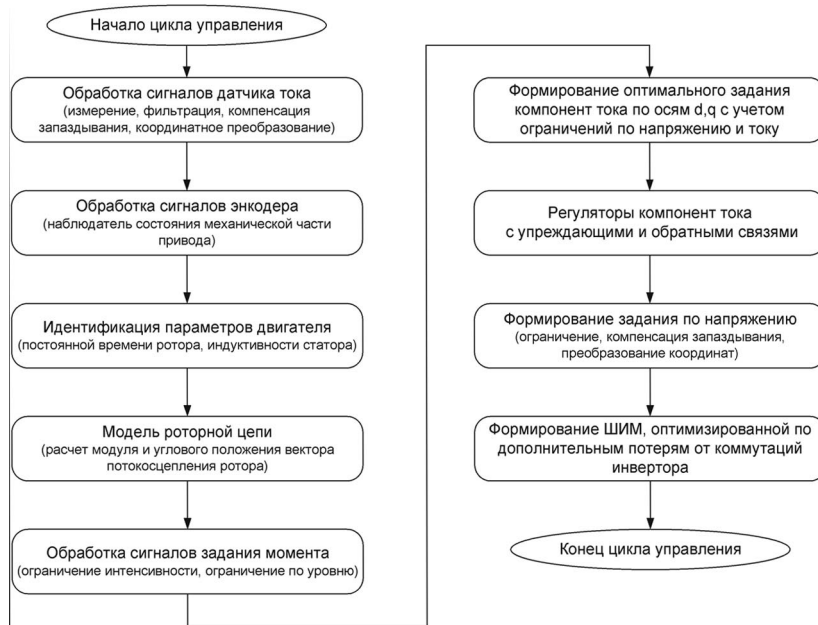


Рис. 2. Блок-схема алгоритмов работы моментного контура МГ с адаптивно-векторным управлением

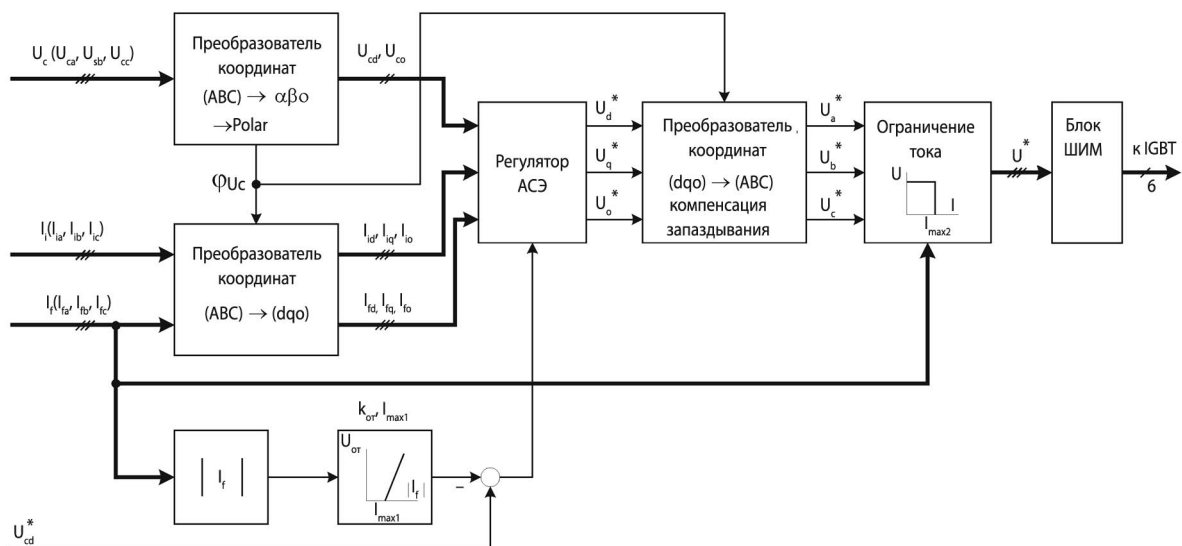


Рис. 3. Структурная схема системы управления АСЭ

$$U_o^* = \text{PiRegLim}(k_{u1}, k_{u2}, -U_{co}) + k_i I_{fo} + (R_f - k_i) I_{io};$$

где  $\text{PiRegLim}$  — функция ПИ-регулятора с ограничением, параметрами которой являются коэффициенты пропорциональной ( $k_{u1}$ ) и интегральной ( $k_{u2}$ ) составляющих регулятора и отклонение регулируемого компонента выходного напряжения АСЭ от его заданного значения;  $U_{dr}$ ,  $U_{qr}$ ,  $U_o$  — компоненты вектора выходного напряжения АСЭ;  $I_{fdr}$ ,  $I_{fqr}$ ,  $I_{for}$ ,  $I_{idr}$ ,  $I_{iqr}$ ,  $I_{io}$  — компоненты векторов выходных токов инвертора и АСЭ;  $L_f$ ,  $R_f$  — индуктивность и активное сопротивление дросселя LC-фильтра;  $C_f$  — емкость LC-фильтра;  $K_i$  — коэффициент обратной связи по току;  $\omega$  — частота выходного напряжения АСЭ.

Коэффициенты регулятора выбираются исходя из желаемого расположения корней характеристического полинома системы [3]. В частности, при настройке процессов в каждой фазе АСЭ на биномиальное распределение 3-го порядка имеем следующие значения коэффициентов регулятора:

$$\begin{aligned} k_i &= R_f - 3\omega_0 L_f; \\ k_{u1} &= 3\omega_0^2 L_f C_f - 1; \\ k_{u2} &= \omega_0^3 L_f C_f; \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\omega_0$  — модуль кратного корня характеристического полинома системы.

Для эффективного ограничения напряжений и токов АСЭ в регуляторе реализована многоуровневая система ограничений, включающая ограничение ПИ-регулятора выходного напряжения, ограничение задания на модуль ШИМ, двухуровневое ограничение выходного тока инвертора. Уровень ограничения ПИ-регулятора выбирается из максимально возможного отклонения вычисленного в регуляторе значения выходного напряжения инвертора от его заданного значения и в большой мере зависит от точности задания параметров LC-фильтра. Первый уровень токоограничения реализует «мягкое» ограничение амплитуды заданного напряжения пропорционально превышению модуля тока значения уставки  $I_{max1}$ . Дополнительным параметром является коэффициент наклона характеристики токоограничения ( $k_{OT}$ ). Время реакции этого ограничения определяется быстродействием регулятора, т.е. величиной  $\omega_0$ . Вторым уровнем токоограничения реализует «жесткое» релейное ограничение фазных напряжений непосредственно на входе модуля ШИМ при превышении модуля мгновенного тока фазы значения уставки  $I_{max2}$ . Время реакции этого ограничения определяется полуперио-

дом модуляции (при частоте модуляции 5 кГц оно составляет 100 мкс).

Рассмотренные ограничения переменных в системе управления дополняются программными и аппаратными защитами АСЭ от сверхтоков, аппаратными защитами АСЭ и электроприемников от перенапряжений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АСЭ

Моделирование процессов в автономном источнике питания выполнялось в среде MATLAB с учетом ШИМ и алгоритмов управления преобразователями АСЭ и МГ. При моделировании динамики принято допущение, что быстродействие процесса обмена энергии между ДВС и МГ с учетом динамики ДВС, кинетической энергии вращающихся масс, электромагнитной энергии, запасенной в обмотках МГ, определяется главным образом настройкой регуляторов МГ. Учет динамики ДВС выполнялся с помощью инерционного звена 1-го порядка на основе данных натурального эксперимента. Представленные ниже результаты получены при следующих параметрах системы автономного питания:

- период модуляции привода МГ: 200 мкс;
- период модуляции инвертора АСЭ: 200 мкс;
- постоянная настройки контура регулирования напряжения ЗПТ в приводе МГ: 0.001 с;
- постоянная настройки регулятора АСЭ:  $T_0 = 1/\omega_0 = 200$  мкс;

- номинальное напряжение ЗПТ: 800 В;

- суммарная емкость ЗПТ: 7000 мкФ;

- параметры схемы замещения МГ:  $L_s = 0,003137$  Гн;  $L_m = 0,00302$  Гн;  $L_s = 0,003137$  Гн;  $R_s = 0,0227$  Ом;  $R_r = 0,0091$  Ом;

- параметры синус фильтра АСЭ:  $L_f = 200$  мкГн;  $C_f = 360$  мкФ.

Заметим, что ниже специально представлены диаграммы работы АСЭ в наиболее тяжелых режимах работы, приводящих к наибольшим отклонениям в регулируемых переменных. В основных типовых режимах работы АСЭ эти отклонения несущественно малы.

На рисунке 4 приведены временные диаграммы выходных фазных напряжений АСЭ, выходных фазных токов инвертора АСЭ (токов в индуктивностях LC-фильтра), напряжения ЗПТ в режимах отключения и последующего включения номинальной активной нагрузки в одной из фаз АСЭ. Исходное и конечное состояние АСЭ соответствует его симметричной активной нагрузке, близкой к номинальной. Величина пульсаций напряжения ЗПТ главным образом определяется величиной асимметрии токов нагрузки, величиной емкости ЗПТ и быстродействием контура регулирования напряжения ЗПТ. Пульсации снижаются при увеличении емкости и быстродействия контура регулирования. В результате моделирования были определены рациональные соотношения между динамическими характеристиками

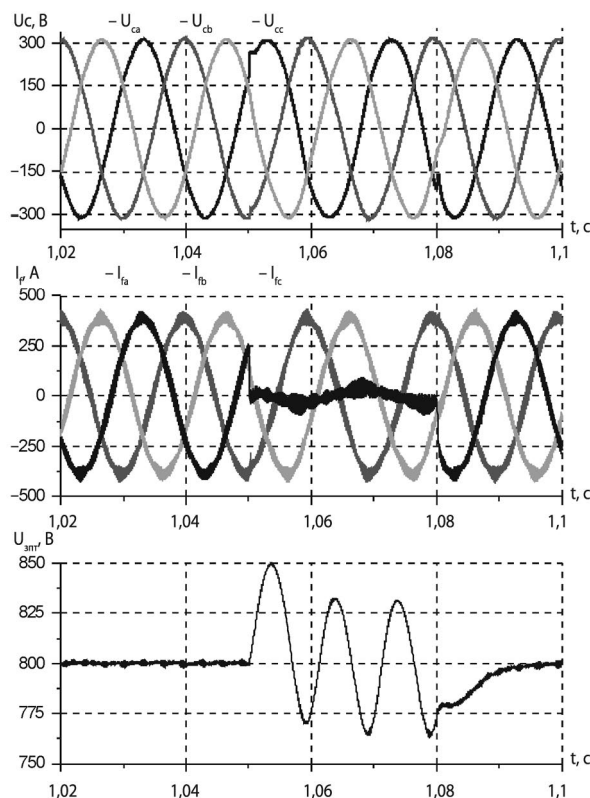


Рис. 4. Временные диаграммы АСЭ в режиме коммутации активной нагрузки в одной фазе

систем управления приводом МГ, инвертором АСЭ и параметрами системы: емкостью ЗПТ, индуктивностью и емкостью LC-фильтра при условии действия физических ограничений на напряжения, токи и частоту переключений преобразователей. Последнее связано с оптимизацией всех силовых устройств по КПД, одной из составляющих которой являются коммутационные потери в преобразователях.

Выполнена оценка качества функционирования источника питания при различных типах нагрузки активной, активно-индуктивной, активно-емкостной как симметричной, так и несимметричной, а также при работе источника на нелинейную нагрузку в виде неуправляемых выпрямителей. Оценка проводилась по следующим критериям качества:

динамика оценивалась по амплитуде и продолжительности отклонения модуля вектора выходного напряжения от его заданного значения при ступенчатом изменении нагрузки в диапазоне от холостого хода до номинальной. В качестве интегрального критерия оценки динамики использовалось также среднеквадратическое значение этого отклонения;

статическая точность оценивалась по относительному отклонению среднего значения модуля вектора выходного напряжения от его заданного значения;

величина отклонения мгновенных значений выходного напряжения АСЭ

от идеальной симметричной трехфазной синусоиды (интегральный показатель несинусоидальности) оценивался по относительному среднеквадратическому отклонению мгновенных значений компонентов вектора выходного напряжения от их заданных значений, соответствующих идеальной трехфазной синусоиде.

Сравнительный анализ качественных показателей работы автономного источника питания проводился для трех вариантов реализации регулятора АСЭ:

1) с модальным регулятором, построенным в естественной системе координат (ABC), при компенсации внешних воздействий (изменения задания и нагрузки);

2) с модальным регулятором, построенным в синхронной системе координат (dqo), при компенсации внешних воздействий и перекрестных связей;

3) с модальным регулятором, построенным в синхронной системе координат (dqo), с учетом компенсации внешних воздействий и перекрестных связей, с астатизмом 1-го порядка по выходному напряжению АСЭ.

Сравнительный анализ показал, что по совокупности указанных показателей качества наилучшими характеристиками обладает вариант 3. Он же показал наименьшую чувствительность характеристик источника к вариациям параметров выходного синус-фильтра относительно своих

базовых значений, введенных в систему управления.

Для варианта 3 регулятора получены следующие показатели качества функционирования автономного источника питания при указанных выше параметрах и работе на RL-нагрузку:

- статическая точность регулирования выходных напряжений АСЭ при изменении нагрузки в пределах от XX до номинальной, включая несимметричные режимы нагрузки: менее 0,5%;

- динамическая ошибка при ступенчатом сбросе/набросе номинальной нагрузки АСЭ (без учета работы супрессора, аппаратно подавляющего перенапряжения в фазах АСЭ): менее  $\pm 80$  В, продолжительность менее 1,5 мс;

- интегральный показатель несинусоидальности выходных фазных напряжений АСЭ при максимальной асимметрии (нагрузка одной фазы — номинальная, двух других — близкая к XX): не более 1%.

- амплитуда пульсаций напряжения ЗПТ в установившемся режиме при симметричной номинальной нагрузке: менее 1 В;

- амплитуда пульсаций напряжения ЗПТ в установившемся режиме при максимальной несимметричной нагрузке (нагрузка одной фазы — номинальная, двух других — близкая к XX): менее  $\pm 35$  В.

- динамическая ошибка напряжения ЗПТ при ступенчатом сбросе/набросе номинальной нагрузки АСЭ: менее 65 В.

Выполнена проверка качества функционирования автономного источника питания в аварийных режимах при входе и выходе из короткого замыкания различных видов: однофазного на землю, межфазного, трехфазного замыкания на землю. Основными критериями является ограничение выходного тока фаз инвертора на желаемом уровне, безопасном для применяемого типа силовых ключей, и отсутствие недопустимых перенапряжений в режиме выхода из короткого замыкания. Предполагается, что если действие аварийного режима не прекращается в течение заданного интервала времени, то за этим следует блокировка инвертора АСЭ с мониторингом причины блокировки. Проверка работы АСЭ в аварийных режимах показала, что во всех аварийных режимах пиковый ток фаз не превышал установленных порогов, а перенапряжения при выходе из КЗ практически отсутствовали. На рисунке 5 приведены временные диаграммы выходного напряжения, выходного тока инвертора АСЭ фазы А, напряжения ЗПТ в режиме замыкания фазы А на нейтральный провод и последующего выхода из этого режима. Все изображенные переменные, как и остальные переменные автономного

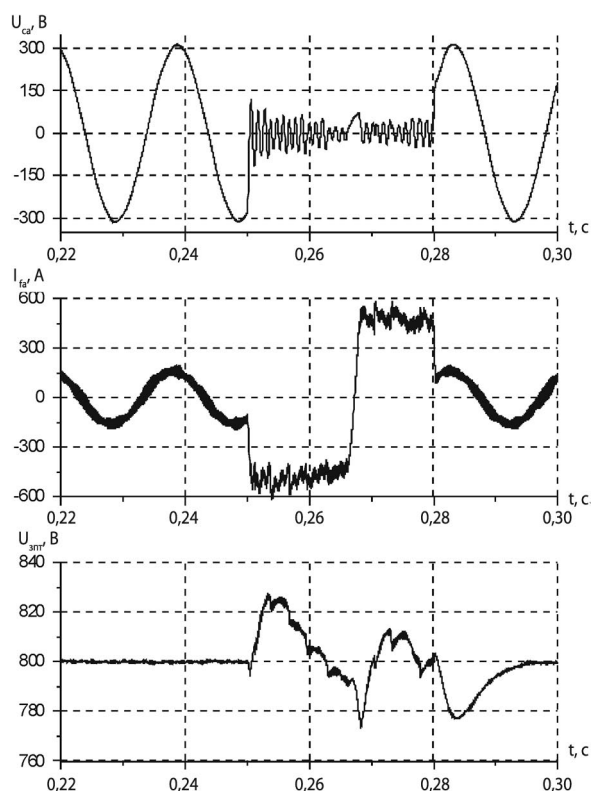


Рис. 5. Временные диаграммы АСЭ в режиме однофазного короткого замыкания

источника питания, находятся в пределах допустимых значений.

На основе представленных результатов моделирования выполнена разработка первого опытного образца автономной станции энергоснабжения.

Его основные технические данные:

- конструктивное исполнение: в виде шкафа для настенного или напольного монтажа (600×800×250 мм<sup>3</sup>);

- силовая часть преобразователя выполнена на основе модуля SKAI3001GD12-1452W фирмы Semikron;

- система управления выполнена на основе микроконтроллера TMS320F2808 фирмы Texas Instruments;

- система охлаждения: жидкостная, автономная.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана структурная схема и алгоритмы векторного управления автономной станцией энергоснабжения, предназначенной для работы в составе транспортного средства с электромеханической трансмиссией.

Сформулированы повышенные требования к динамическим характе-

ристикам систем управления приводом мотор-генератора и автономной станцией энергоснабжения при условии работы со звеном постоянного тока относительно небольшой емкости.

Выполнено математическое моделирование процессов, протекающих в рабочих и аварийных режимах функционирования автономного источника питания с учетом ШИМ и алгоритмов управления преобразователями АСЭ и МГ, что позволило:

- в результате сравнительного анализа по сформулированным критериям качества определить оптимальную структуру регулятора: модальный, построенный в синхронной системе координат ( $dqo$ ), с учетом компенсации внешних воздействий и перекрестных связей, с астатизмом 1-го порядка по выходному напряжению АСЭ;

- определить рациональное сочетание параметров источника питания: параметров системы управления приводом МГ, емкости ЗПТ, параметров системы управления АСЭ, параметров синус фильтра, обеспечивающее желае-

мые характеристики системы автономного энергоснабжения;

- выполнить исследования работы АСЭ при различных типах нагрузки: активной, активно-индуктивной, активно-емкостной как симметричной, так и несимметричной, а также при работе источника на нелинейную нагрузку в виде неуправляемых выпрямителей, которые удовлетворили предъявляемым к АСЭ требованиям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А.Б. Виноградов. Системы управления электроприводами гибридных транспортных средств/А.Б. Виноградов//Сборник материалов конференции «Силовая электроника». Москва. 6 июня 2008 г. С. 89.

2. А.Б. Виноградов. Векторное управление электроприводами переменного тока/А.Б. Виноградов. — Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». 2008. — 318 с.

3. Н.Т. Кузовков. Модальное управление и наблюдающие устройства/Н.Т. Кузовков. — М.: Машиностроение, 1976. — 184 с.