

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ПРОВАЛАМ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

Рассматривается принцип управления групповым частотно-регулируемым приводом со скалярной системой управления при кратковременных провалах напряжения в питающей сети. Представлена функциональная схема системы управления преобразователем частоты, позволяющая ограничить броски тока на входе автономного инвертора напряжения в момент резкого восстановления напряжения в питающей сети. Рассмотрены результаты исследования предлагаемого способа управления, полученные в процессе имитационного моделирования частотно-регулируемого привода в среде «MatLab».

Ключевые слова: система электроснабжения, защита минимального напряжения, преобразователь частоты, система управления, инвертор напряжения, общий выпрямитель, провал напряжения, частотное регулирование, звено постоянного напряжения.

В настоящее время в различных отраслях промышленности эксплуатируется частотно-регулируемый привод (ЧРП) и групповой частотно-регулируемый привод (ГЧРП). ГЧРП представляет собой сложный электротехнический комплекс, состоящий из системы электроснабжения, системы управления, ЧРП, исполнительных механизмов, приводимых в движение ЧРП. В агропромышленном секторе существует множество предприятий с непрерывным процессом производства, на которых эксплуатируется ГЧРП [1, 2]. Аварийная остановка процесса непрерывного производства может привести к увеличению времени повторного запуска оборудования, браку продукции, преждевременному выходу из строя механических узлов оборудования из-за возникновения динамических нагрузок в процессе неуправляемой остановки механизмов, возникновению аварий [3]. В большинстве случаев аварийная остановка оборудования с ГЧРП во время кратковременного снижения напряжения в питающей сети возникает по причине срабатывания защиты минимального напряжения (ЗМН), контролирующей напряжение в звене постоянного напряжения (ЗПН) ЧРП [4]. Срабатывание ЗМН происходит при возникновении переходных процессов и аварийных режимов в системе электроснабжения, переключении автоматического включения резерва (АВР) и автоматического повторного включения (АПВ) [5], коротких замыканий в линии электропередач и включения мощной нагрузки [6]. Интервал времени, в течение которого ЧРП и ГЧРП продолжает работать в условиях понижения питающего напряжения в сети ниже допустимой нормы, составляет 0,02 – 0,04 с.

При снижении напряжения в питающей сети штатными системами управления (СУ) автономными инверторами напряжения (АИН) для предотвращения возникновения аварийных бросков тока в транзисторных ключах АИН в момент резкого восстановления напряжения на их входах обеспечивается снятие импульсов управления транзисторами АИН. Существующие системы АПВ в преобразователях частоты (ПЧ) обеспечивают автоматический запуск ЧРП и ГЧРП в работу после срабатывания ЗМН по окончанию заряда конденсатора С-фильтра ЗПН и полной остановки асинхронного двигателя (АД). Интервал времени подготовки ПЧ к повторному запуску в 10 – 15 раз превышает время кратковременного снижения напряжения в питающей сети при возникновении дестабилизирующих факторов, влияющих на сеть [7].

Срабатывание ЗМН, входящей в состав ПЧ, приводит к остановке технологического оборудования с ЧРП и ГЧРП, аварийным ситуациям на производстве, снижению ресурса технологического оборудования. В агропромышленном комплексе эксплуатируются технологические установки с ЧРП и ГЧРП, в которых, в соответствии с условиями технологического процесса, допускается кратковременное снижение скорости АД без полной остановки приводимых в движение механизмов на интервале времени преодоления кратковременного снижения напряжения в питающей сети. Для повышения устойчивости ЧРП к кратковременным провалам напряжения в лаборатории силовой электроники Комсомольского-на-Амуре университета разработан способ управления ЧРП и ГЧРП, направленный на увеличение времени ожидания на-

пряжения при возникновении аварийных режимов работы в питающей сети [8].

Работа ЧРП при снижении питающего напряжения характеризуется двумя случаями. В случае снижения напряжения в питающей сети до уровня, при котором не происходит срабатывания ЗМН,

$$U_{DC,Hom.} > U_{DC} > U_{DC,Minn.}$$

где $U_{DC,Hom.}$ — номинальное значение напряжения в ЗПН, В; U_{DC} — фактическое значение напряжения в ЗПН, В; $U_{DC,Minn.}$ — напряжение срабатывания уставки ЗМН.

Привод продолжает работать с уменьшенным электромагнитным моментом.

В случае если $U_{DC} < U_{DC,Minn.}$ штатной СУ ЧРП осуществляется отключение привода за счёт снятия импульсов управления IGBT транзисторами АИН, с переводом АД на режим свободного выбега, повторный запуск ЧРП возможен после полной остановки АД, восстановления напряжения в трёхфазной сети и заряда конденсатора С-фильтра ЗПН до значения $U_{DC,Hom.}$. Время подготовки к повторному включению ЧРП $t_{p.b.}$ зависит от времени заряда конденсатора, определяемого параметрами токоограничительной цепи t_{RC} и быстродействием системы шунтирования токоограничительной цепи $t_{C.SH.}$, $t_{p.b.} = t_{RC} + t_{C.SH.}$.

После восстановления напряжения в питающей сети длительность $t_{p.b.}$ может превышать длительность кратковременного провала напряжения в трёхфазной сети в 10–15 раз.

Скорость разряда конденсатора С-фильтра ЗПН определяется следующими соотношениями:

мощность потребляемая АИН от ЗПН

$$P_{Bx,AIN} = U_{DC} \cdot I_{Bx,AIN}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $I_{Bx,AIN}$ — входной ток автономного инвертора, А; мощность, потребляемая АД от АИН,

$$P_{Ab.} = \sqrt{3} \cdot U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \cos \varphi, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где U_{m1} — амплитуда линейного напряжения первой гармоники на выходе АИН, В; I_{m1} — амплитуда тока первой гармоники на выходе АИН, А.

В установившемся режиме работы ЧРП $P_{Bx,AIN} = P_{Ab.}$ амплитуда первой гармоники линейного напряжения на выходе АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) определяется в соответствии с выражением

$$U_{m1} = \frac{mU_{DC}}{\sqrt{2}}, \text{ В}, \quad (3)$$

где m — коэффициент модуляции АИН.

Входной ток АИН, зависящий от активной составляющей тока АД, определяется соотношением

$$I_{Bx,AIN} = \frac{\sqrt{3}m \cdot I_{m1} \cdot \cos \varphi}{\sqrt{2}}, \text{ А}. \quad (4)$$

Интервал времени разряда конденсатора С-фильтра ЗПН до значения напряжения звена постоянного напряжения $U_{DC} = 0$ определяется из уравнения энергетического баланса как

$$T = \frac{U_{DC}^2 \cdot C_\phi}{2P_{Ab.} K_p}, \text{ с}, \quad (5)$$

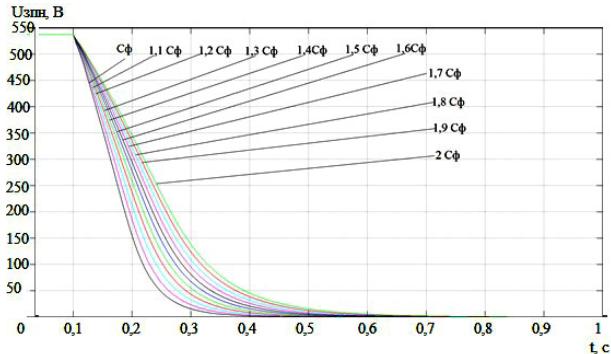


Рис. 1. Осциллограммы зависимости скорости изменения напряжения в ЗПН от ёмкости C_ϕ

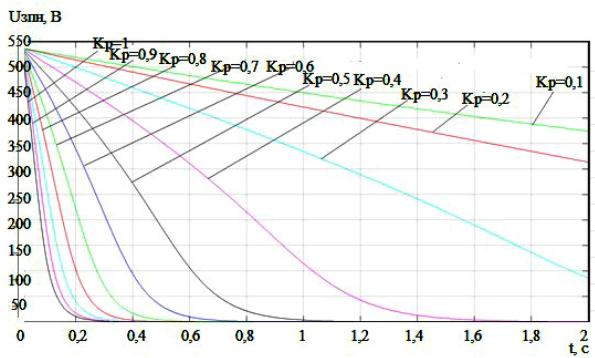


Рис. 2. Осциллограммы зависимости изменения напряжения на конденсаторе C_ϕ ЗПН от коэффициентов загрузки K_p АД

где C_ϕ — ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН, Ф; K_p — коэффициент загрузки АД.

Зависимость коэффициента загрузки АД от угловой скорости при вентиляторной нагрузке на валу двигателя определяется выражением

$$K_p = \frac{\omega^3}{(\omega - s \cdot \omega)^3}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где ω — номинальная скорость АД; s — скольжение.

Таким образом, скорость разряда конденсатора С-фильтра ЗПН зависит от ёмкости конденсатора С-фильтра [9] и степени загрузки АД при разряде конденсатора после снятия напряжения в питающей сети.

На рис. 1 представлены экспериментальные осциллографы, характеризующие зависимость изменения напряжения в ЗПН от ёмкости C_ϕ при его разряде после снятия питающего напряжения с входа АИН, полученные в среде имитационного моделирования Matlab.

На рис. 2 представлены осциллографы изменения напряжения на конденсаторе C_ϕ ЗПН при различных коэффициентах загрузки K_p АД после снятия напряжения с входа АИН. Исходя из полученных в ходе эксперимента данных установлено, что увеличить время ожидания восстановления напряжения в питающей сети возможно за счёт замедления скорости АД одновременно со снижением напряжения в ЗПН на интервале времени разряда конденсатора C_ϕ при сохранении управления АД ЧРП.

В лаборатории силовой электроники Комсомольского-на-Амуре государственного университета разработана СУ, реализующая способ управления

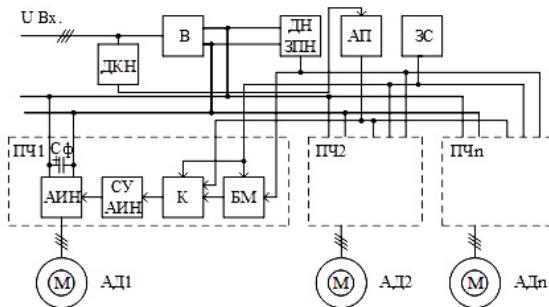


Рис. 3. Функциональная схема ГЧРП с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в питающей сети

выходной частотой АИН для замедления снижения напряжения в ЗПН по мере разряда конденсатора C_{ϕ} ЗПН и ограничения бросков входного тока АИН в момент резкого восстановления питающей напряжения на его входе с сохранением управления приводом на интервале преодоления аварийных режимов в питающей сети.

На рис. 3 представлена функциональная схема ГЧРП с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в питающей сети.

Функциональная схема ГЧРП рис. 3 содержит питающую сеть (U_{Bx}), датчик контроля напряжения в трёхфазной сети (ДКН), общий трёхфазный выпрямитель (В), датчик контроля напряжения в ЗПН (ДН ЗПН), анализатор провалов в трёхфазной сети (АП), задатчик скорости асинхронных двигателей (ЗС), преобразователи частоты (ПЧ1, ПЧ2, ПЧn), асинхронные двигатели (АД1, АД2, АДп), подключенные к выходам ПЧ. В состав ПЧ входят: конденсатор С-фильтра C_{ϕ} ЗПН, система управления автономным инвертором (СУ АИН), коммутатор (К), блок масштабирования (БМ).

В предлагаемой схеме входы АИН, входящие в состав ПЧ, подключены к выходу общего выпрямителя [10]. В штатном режиме работы ГЧРП, скорость всех АД определяется заданием от общего ЗС. При возникновении в питающей сети отклонения напряжения от нормы, в АП формируется сигнал управления коммутатором К, который переводит СУ АИН в режим управления скоростью АД напряжением ЗПН. В процессе снижения напряжения в ЗПН осуществляется изменение задания скорости БМ с поочерёдным переводом АД из двигательного режима в режим генераторного торможения, что обеспечивает замедление разряда конденсатора C_{ϕ} и увеличение интервала ожидания восстановления напряжения в питающей сети. При восстановлении напряжения в питающей сети осуществляется разгон АД до номинальной скорости, без полной остановки, возникновения электродинамических ударов в статорных обмотках АД и превышения тока в транзисторных ключах АИН выше аварийного значения.

Возможность управления снижением скорости и разгоном АД изменяющимся напряжением в ЗПН при вентиляторной механической нагрузке основана на законе частотного регулирования $\frac{U}{f^2} = \text{const}$. Среднее значение напряжения в фазах на выходе трёхфазного АИН для выполнения закона частотного регулирования $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ определяется выражениями:

$$U_{\text{Вых.АИН}} = \frac{K \sin(2\pi f_{\text{Вых.АИН}}) U_{DC.\text{Hom.}}}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

где K — коэффициент заполнения ШИМ, изменяющийся в диапазоне $K = 0...1$ при управлении $f_{\text{Вых.АИН}} = 0...50$ Гц [11, 12]:

$$K = \frac{f_{DC.\text{Hom.}}}{f_{\text{Вых.АИН}}} . \quad (8)$$

В случае управления выходной частотой $f_{\text{Вых.АИН}}$ изменяющимся напряжением в ЗПН $U_{DC.Var.}$ в процессе разгона АД до номинальной скорости среднее значение напряжений трёхфазной системы на выходе трёхфазного АИН определяется выражениями:

$$U_{\text{Вых.АИН}} = \frac{K_{DC.Var.} \sin(2\pi f_{\text{Вых.АИН} DC.Var.}) U_{DC.Var.}}{\sqrt{2}}, \quad (9)$$

где $K_{DC.Var.}$ — коэффициент заполнения при ШИМ IGBT транзисторов силового модуля АИН, зависящий от задания выходной частоты АИН $f_{\text{Вых.АИН}}$ на момент восстановления напряжения в ЗПН; $f_{\text{Вых.АИН} DC.Var.}$ — частота на выходе АИН в режиме управления заданием выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН:

$$f_{\text{Вых.АИН} DC.Var.} = f_{\text{Вых.АИН}} \frac{U_{DC.Var.}}{U_{DC.Hom.}} . \quad (10)$$

При управлении выходной частотой $f_{\text{Вых.АИН} DC.Var}$ изменяющимся в ЗПН напряжением $U_{DC.Var}$ управляющим воздействием является напряжение $U_{DC.Var.}$. При изменении $U_{DC.Var.}$ в диапазоне $U_{DC.Var.} = -0...U_{DC.Hom.}$ для выражения (7) сохраняется закон частотного регулирования $\frac{U}{f^2} = \text{const}$.

В штатной СУ ЧРП при разряде конденсатора звена постоянного напряжения и снижении напряжения в ЗПН срабатывает ЗМН, предотвращающая броски аварийного тока в транзисторных ключах АИН при резком восстановлении напряжения на входе АИН, возникающие по двум причинам.

При резком восстановлении напряжения на входе АИН выходное напряжение АИН $U_{\text{Вых.АИН}}$ для каждой из фаз определяется выражением:

$$U_{\text{Вых.АИН}} = \frac{K_{DC.Var.} \cdot U_{DC.Hom.}}{\sqrt{2}} . \quad (11)$$

При разряде конденсатора С-фильтра ЗПН после снятия питающего напряжения, $U_{\text{Вых.АИН}}$ приложенное к статорной обмотке АД, снижается до $U_{\text{Вых.АИН.Проб.}}$. В момент восстановления напряжения $U_{\text{Вых.АИН.Проб.}} < U_{\text{Вых.АИН}}$ что приводит к броску тока в транзисторных ключах АИН и обмотках статора АД.

Вторая причина связана с нарушением синхронизации выходного тока $I_{\text{Вых.АИН},m1}$ частоты первой гармоники и тока статора $I_{Cm,AD,m1}$ асинхронного двигателя. Нарушение синхронизации $I_{\text{Вых.АИН},m1}$ и $I_{Cm,AD,m1}$ связано со снижением скорости АД в режиме выбега по отношению к заданию выходной частоты АИН $I_{\text{Вых.АИН}}$. Для преодоления провала напряжения в ЗПН с отсутствием бросков тока на входе АИН $I_{\text{Вых.АИН}}$ и тока в статоре АД $I_{Cm,AD}$ необходимо выполнить на момент восстановления напряжения следующие условия:

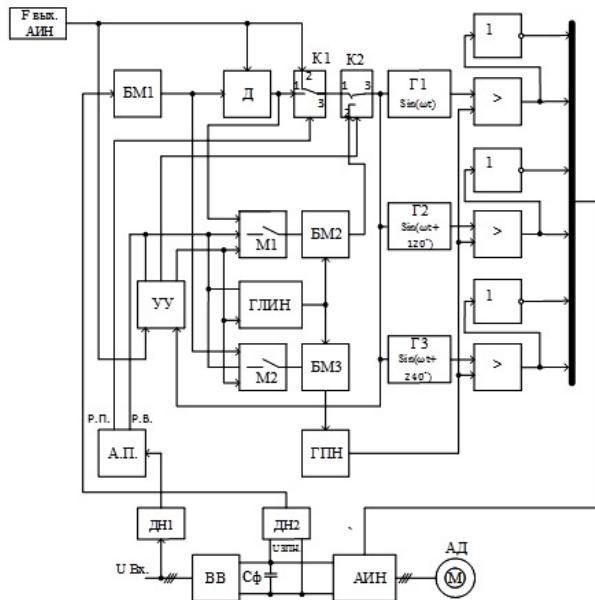


Рис. 4. Функциональная схема комбинированной системы управления АИН

— равенство частот

$$f_{\text{Вых.АИН}} = \omega_{\text{s.v.}} / 2\pi, \quad (12)$$

где $\omega_{\text{s.v.}}$ — радиальная скорость вектора поля статора;

— равенство выходного напряжения формируемого на выходе АИН системой управления $U_{\text{Вых.АИН}}$ и остаточного напряжения на обмотке АД $U_{\text{ст.АД.ост.}}$ в момент восстановления напряжения в звене постоянного напряжения

$$U_{\text{Вых.АИН}} = U_{\text{ст.АД.ост.}}. \quad (13)$$

Из анализа выражений (9), (10) следует, что сохранение равенства $f_{\text{Вых.АИН}} = \omega_{\text{s.v.}} / 2\pi$ и $U_{\text{Вых.АИН}} = U_{\text{ст.АД.ост.}}$ можно достичь в момент восстановления напряжения на входе АИН за счёт контроля значения $f_{\text{Вых.АИН}}$ системой управления и одновременной подстройкой коэффициента заполнения ШИМ $K_{\text{DC.Var.}}$ в соответствии с изменением напряжения на входе АИН. Включение АИН в работу без нарушения синхронизации тока статора АД и выходного тока АИН при отсутствии бросков тока статора АД и входного тока АИН с разгоном АД до номинальной скорости после восстановления напряжения на входе АИН возможно за счёт одновременного изменения $K_{\text{DC.Var.}}$ и $f_{\text{Вых.АИН}}$ в пропорции, изменяющейся в соответствии с кривой разгона АД.

На рис. 4 представлена функциональная схема разработанной комбинированной СУ, позволяющая устранить аварийные броски входного тока АИН при восстановлении напряжения на входе АИН с последующим разгоном АД до заданной скорости с любой пониженной скоростью.

В нормальном режиме закон регулирования подчиняется отношению $U/f^2 = \text{const}$. В момент регистрации глубокого провала напряжения в питающей сети на вход анализатора провала напряжения (АП) с датчика напряжения (ДН1) поступает информация о начале провала напряжения и на его выходе (РП) формируется сигнал управления коммутатором (К1), вход 1 которого в момент возникновения провала напряжения подключается к выходу 3.

С датчика напряжения (ДН2) информация об изменяющемся напряжении ЗПН поступает через блок масштабирования (БМ1) на вход делителя (Δ), на выходе которого формируется сигнал управления выходной частотой АИН в соответствии с законом изменения напряжения U_{DC} , поступающий на вход управления частотой опорных генераторов (Г1-Г3) через коммутатор (К2). С Г1-Г3 синусоидальное напряжение с изменяющейся частотой поступает на входы компараторов. В компараторах амплитуда напряжения, изменяющаяся по синусоидальному закону, сравнивается с напряжением, формируемым на выходе генератора пилообразного напряжения (ГПН). На выходе компараторов формируется ШИМ сигнал управления силовыми IGBT транзисторами АИН.

В момент восстановления напряжения в питающей сети на выходе А.П. формируется сигнал режима восстановления (Р.В.), поступающий на входы устройства управления (УУ), элементов памяти M1, M2 и вход управления генератором линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН).

Одновременно на выходе УУ формируется сигнал управления коммутатором К2, который подключает выход 3 к входу 2. Элемент памяти M1 сохраняет информацию о значении выходной частоты АИН, а M2 — о значении остаточного напряжения в ЗПН на момент восстановления напряжения в системе электроснабжения.

Одновременно с восстановлением напряжения в питающей сети запускается генератор линейно изменяющегося напряжения, скорость нарастания выходного напряжения определяется временем разгона АД с момента восстановления напряжения в ЗПН с пониженной скорости до номинальной. На входы блоков масштабирования БМ2 и БМ3 поступает информация с M1, M2. На выходе блока БМ2 формируется сигнал управления выходной частотой АИН, а на выходе БМ3 формируется сигнал управления амплитудой пилообразного напряжения ГПН для коррекции коэффициента модуляции и выполнения условия баланса напряжения. Дальнейшее управление выходной частотой и выходным напряжением АИН осуществляется в соответствии с законом плавного нарастания напряжения на выходе ГЛИН, которое определяется заданной интенсивностью разгона АД до номинальной скорости в соответствии с технологическим процессом. По достижению выходной частоты АИН заданного значения $f_{\text{Вых.АИН}}$ происходит переключение К2 в исходное состояние, ГПН переводится в исходный режим работы, ГЛИН, ячейки памяти M1, M2 подготавливаются к работе для регистрации следующего провала.

На рис. 5 представлена имитационная модель с комбинированной СУ ГЧРП. В качестве основы имитационной модели для исследования динамических процессов, возникающих в силовой части ЧРП при возникновении аварийных режимов работы системы электроснабжения, использован программный комплекс [13], разработанный в среде MatLab. Проанализируем результаты экспериментов, полученные в среде MatLab с штатной и комбинированной СУ ГЧРП. В имитационной модели ГЧРП использовались 3 ЧРП с АД АДКЗР мощностью $P_h = 160$ кВт с вентиляторной механической нагрузкой.

На рис. 6 представлены осциллограммы, полученные в процессе исследования ГЧРП с вентиляторной механической нагрузкой и штатной системой управления.

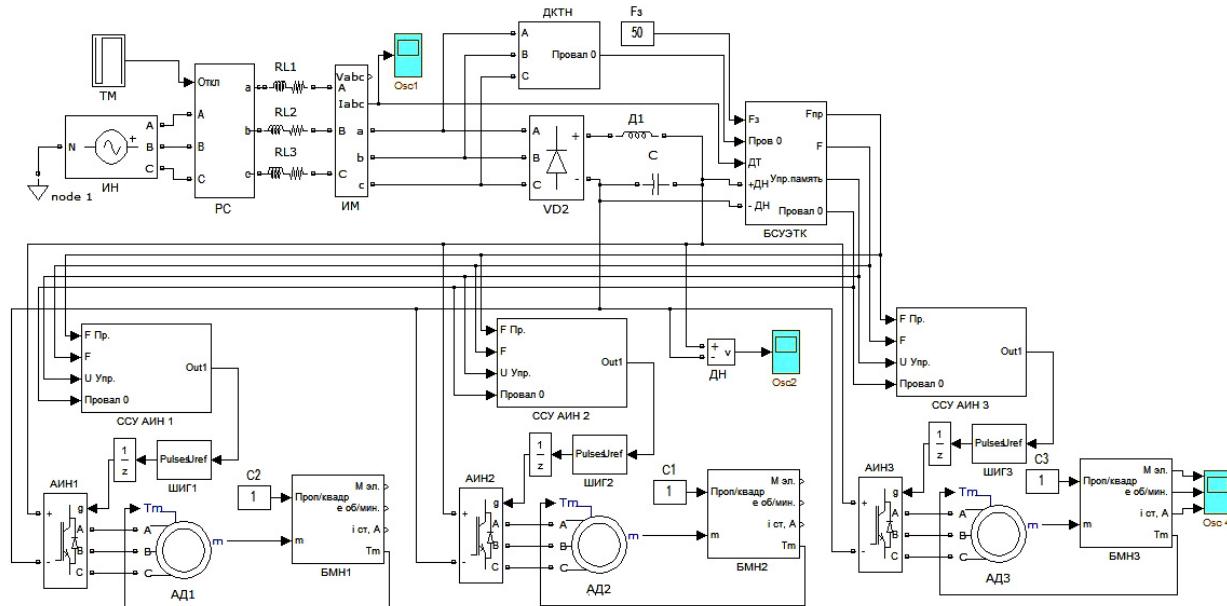
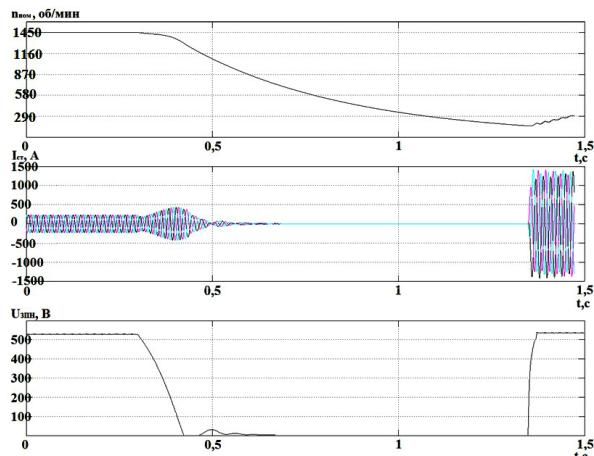
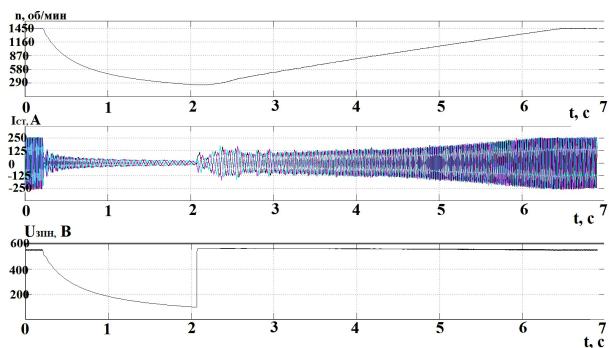


Рис. 5. Имитационная модель ГЧРП с повышенной устойчивостью к провалам напряжения

Рис. 6. Осциллограммы изменения: I_{ct} — тока статора АД; U_{zph} — напряжения на конденсаторе С-фильтра; n — скорости АД при квадратичной нагрузке АД по штатной схеме СУ ЭТК с ГЧРПРис. 7. Осциллограммы работы ГЧРП на интервале нормального, аварийного и послеаварийного режима питающей сети: I_{ct} — тока статора АД; U_{zph} — напряжения на конденсаторе С-фильтра; n — скорости АД

Условия эксперимента следующие: суммарная мощность ГЧРП РГЧРП = 480 кВт мощность исследуемого комплекта АИН-АД в составе ГЧРП $P_{AIN-AD} = 160$ кВт, номинальный ток двигателя

$I_{Cm,AD,Hom.} = 243$ А, ёмкость конденсаторов С-фильтра ЗПН $C_{Ф,ЗПН} = 285000$ мкФ, нагрузка АД вентиляторная.

На рис. 7 проиллюстрированы осциллограммы изменения тока статора АД, напряжения на конденсаторе С-фильтра, скорости АД на интервале времени преодоления аварийного режима в питающей сети при применении комбинированной СУ.

При построении СУ ГЧРП по штатной схеме интервал времени $T_{p,упр.}$ в течение которого сохраняется управление приводом после провала напряжения в питающей сети до срабатывания ЗМН, определяется в соответствии с выражением:

$$T_{p,upr.} = \frac{U_{DC,Hom.}^2 - (0,6U_{DC,Hom.})^2 C_{Ф,ЗПН}}{2P_{Ad.}} \quad (14)$$

и составляет $T_{p,upr.} = 0,06$ с.

Интервал времени $T_{p,упр,КСУ}$ в течение которого сохраняется управление приводом при применении комбинированной СУ для управления ГЧРП в соответствии с осциллограммами, представленными на рис. 7, составляет $t = 1,8$ с. Предложенная комбинированная схема СУ позволяет обеспечить управление ЧРП и ГЧРП без остановки АД при кратковременном провале напряжения в питающей сети, без аварийных бросков тока в транзисторах АИН, с сохранением режима управления приводом на всём интервале времени аварийного режима сети $t = 1,8$ с, при плавном снижении тока статора АД $I_{Cm.}$ по мере разряда конденсатора С-фильтра ЗПН, с последующим нарастанием $I_{Cm.}$ до номинального значения без возникновения перегрузки АИН.

Применение комбинированной СУ увеличивает время ожидания восстановления нормального режима сети в 30 раз по сравнению со штатной схемой СУ. Практическое применение разработанной системы управления АИН позволяет сохранить управление приводом на интервале времени включения АВР, а также при возникновении кратковременных провалов напряжения в питающей сети и устраниТЬ аварийную остановку технологического оборудования с вентиляторным характером механической нагрузки.

В настоящее время также проводятся исследования, связанные с возможностью управления ГЧРП в соответствии с предлагаемым способом при векторном режиме управления для практического применения в промышленности.

Список источников

1. Ершов М. С. Устойчивость многомашинных промышленных электротехнических комплексов и систем // Труды VIII Междунар. (XIX Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. 07–09 октября 2014 года: в 2 т. Саранск: Мордовский гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2014. Т. 1. С. 268–274. EDN: TBJJV.
2. Веселова Н. М., Иванов А. С., Иванова О. А. [и др.] Влияние частотных преобразователей насосных и вентиляционных установок на работу сети внутреннего электроснабжения предприятия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3. С. 82–89. EDN: XCAPP.
3. Петухов А. В., Климанш В. С. Опыт эксплуатации комплекса электроприводов автоматизированных линий по производству шпона // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 10–21 апреля 2017 года. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2017. С. 858–860. EDN: YQFJTE.
4. Климанш В. С., Петухов А. В. Исследование устойчивости электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии к провалам напряжения в сети электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 184–190. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-184-190. EDN: KHAJT.
5. Гуревич В. И. Автоматическое повторное включение промышленных электроустановок // Промышленная энергетика. 2005. № 8. С. 8–10. EDN: HTAXH.
6. Ершов С. В., Жабин Б. А. Особенности определения провалов напряжения в системах электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 8. С. 97–103. EDN: SNUOWR.
7. Петухов А. В., Киба Д. А. Управление электротехническим комплексом с групповым частотно-регулируемым приводом при провалах напряжения в питающей сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 579–584. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-579-580. EDN: GITLLE.
8. Пат. 2740813 Российской Федерации, Н02Р 1/16, Н02Р 3/06. Способ управления электроприводом деревообрабатывающей линии во время автоматического включения резерва / Климанш В. С., Петухов А. В. № 2020107224; заявл. 17.02.2020; опубл. 21.01.2021. Бюл. № 3.
9. Гельвер Ф. А., Белоусова Н. В., Самосейко В. Ф., Сашев А. В. Выбор емкости конденсатора звена постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты с инвертором напряжения // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы II Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург: Молодой учёный, 2014. С. 44–47. EDN: QZKIVN.
10. Пат. на полезную модель 181730 Российской Федерации, В27L 5/02. Электропривод деревообрабатывающей линии по производству шпона. Климанш В. С., Петухов А. В., Соколовский М. А. № 2017130399; заявл. 28.08.2017; опубл. 26.07.2018. Бюл. № 21.
11. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 651 с. ISBN 5-7782-0323-3. EDN: QMHYZ.
12. Куделько А. Р. Автоматизированный частотно-регулируемый электропривод с асинхронными двигателями. Владивосток: Изд-во Дальневосточного ун-та, 1992. 182 с.
13. Климанш В. С., Петухов А. В. Программный комплекс математической модели электропривода деревообрабатывающей линии в среде MatLab: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611165 от 22.01.2021. Москва: ФИПС, 2021.

ПЕТУХОВ Александр Владимирович, старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, г. Комсомольск-на-Амуре.

Адрес для переписки: petuhovaleasander@yandex.ru

Для цитирования

Петухов А. В. Разработка и исследование системы управления групповым частотно-регулируемым приводом с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в сети // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 76–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-76-83. EDN: EQVFHC.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025 г.

© А. В. Петухов

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE CONTROL SYSTEM OF THE GROUP VARIABLE FREQUENCY DRIVE WITH INCREASED RESISTANCE TO NETWORK VOLTAGE SAGS

The functional scheme of the frequency converter control system is presented, that allows limiting the current surges at the input of the autonomous voltage inverter at the moment of sharp voltage recovery in the supply network. The author describes the research results of the proposed control method in the simulation modeling of a frequency-controlled drive in the MatLab software.

Keywords: power supply system, minimum voltage protection, frequency converter, control system, voltage inverter, common rectifier, voltage dip, frequency regulation, DC link.

References

1. Ershov M. S. Ustoychivost' mnogomashinnykh promyshlennykh elektrotehnicheskikh kompleksov i sistem [Stability of multi-machine industrial electrical engineering complexes and systems] // Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014. In 2 vols. Saransk, 2014. Vol. 1. P. 268–274. EDN: TBJJVF. (In Russ.).
2. Veselova N. M., Ivanov A. S., Ivanova O. A., Kuznetsova T. A., Nikolaeva S. I. [et al.]. Vliyanie chastotnykh preobrazovateley nasosnykh i ventilyatsionnykh ustavok na rabotu seti vnutrennego elektrosnabzheniya predpriyatiya [Influence of frequency converters of pumping and ventilation installations on the operation of the internal power supply network of the enterprise]. Inzhenernyy vestnik Dona. *Engineering Journal of Don.* 2022. No. 3. P. 82–89. EDN: XCAPPSS. (In Russ.).
3. Petukhov A. V., Klimash V. S. Opyt ekspluatatsii kompleksa elektroprivodov avtomatizirovannykh liniy po proizvodstvu shpona [Experience of operation of the electric drives complex for automated veneer production lines]. *Nauchno-Tekhnicheskoye Tvorchestvo Aspirantov i Studentov.* Komsomolsk-on-Amur, 2017. P. 858–860. EDN: YQFJTE. (In Russ.).
4. Klimash V. S., Petukhov A. V. Issledovaniye ustoychivosti elektrotehnicheskogo kompleksa derevoobrabatyvayushchey linii k provalam napryazheniya v seti elektrosnabzheniya [Investigation of the stability of the electrical engineering complex of the woodworking line to voltage failures in the power supply network]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. *News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2022. No. 3. P. 184–190. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-184-190. EDN: KHAPTJ. (In Russ.).
5. Gurevich V. I. Avtomaticheskoye povtornoye vklyucheniye promyshlennykh elektrostanovok [Auto-reclosing for electrical installation]. Promyshlennaya energetika. *Industrial Power Engineering.* 2005. No. 8. P. 8–10. EDN: HTAXHX. (In Russ.).
6. Ershov S. V., Zhabin B. A. Osobennosti opredeleniya provalov napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya [Features of definition of voltage dips in power supply systems]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. *News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2014. No. 8. P. 97–103. EDN: SNUOWR. (In Russ.).
7. Petukhov A. V., Kiba D. A. Upravleniye elektrotehnicheskim kompleksom s gruppovym chastotno-reguliruyemym privodom pri provalakh napryazheniya v pitayushchey seti [Control of an electrical complex with a group frequency-controlled drive in case of voltage failures in the network]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. *News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2024. No. 9. P. 579–584. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-579-580. EDN: GITTEL. (In Russ.).
8. Patent 2740813 Russian Federation, H02P 1/16, H02P 3/06. Sposob upravleniya elektroprivodom derevoobrabatyvayushchey linii vo vremya avtomaticheskogo vklyucheniya rezerva [Method of controlling the electric drive of a woodworking line during automatic activation of the reserve] / Klimash V. S., Petuhov A. V. No. 2020107224. (In Russ.).
9. Gel'ver F. A., Belousova N. V., Samoseyko V. F., Saušev A. V. Vybor yemkosti kondensatora zvena postoyannogo toka dvukhsvennogo preobrazovatelya chastyot s invertorom napryazheniya [Selection of DC link capacitor size of a two-link frequency inverter with voltage inverter] // Tekhnicheskiye nauki: Problemy i Perspektivy. Saint Petersburg, 2014. P. 44–47. (In Russ.).
10. Patent RU 181730 Russian Federation, B27L 5/02. Elektroprivod derevoobrabatyvayushchey linii po proizvodstvu shpona [Electric drive for wood veneer production line] / Klimash V. S., Petuhov A. V., Sokolovskiy M. A. No. 2017130399. (In Russ.).
11. Zinoviev G. S. Osnovy silovoy elektroniki [Basic power electronics]. Novosibirsk, 2003. 651 p. ISBN 5-7782-0323-3. EDN: QMHYZUZ. (In Russ.).

12. Kudelko A. R. Avtomatizirovannyj chastotnoreguliruyemyy elektroprivod s asinkhronnymi dvigatelyami [Automated frequency-controlled electric drive with asynchronous motors]. Vladivostok, 1992. 182 p. (In Russ.).
13. Klimash V. S., Petuhov A. V. Programmnyy kompleks matematicheskoy modeli elektroprivoda derevoobrabatyvayushchey linii v srede MatLab [Software complex of mathematical model of woodworking line electric drive in MatLab]: Certificate No. 2021611165 dated 22.01.2021. Moscow: FIPS, 2021. (In Russ.).

PETUKHOV Alexander Vladimirovich, Senior Lecturer of the Industrial Electronics and Innovative

Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur. Correspondence address: petuhovaleasander@yandex.ru

For citations

Petukhov A. V. Development and research of the control system of the group variable frequency drive with increased resistance to network voltage sags. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 76–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-76-83. EDN: EQVFHC.

Received January 09, 2025.

© A. V. Petukhov